

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Deteção remota e geoprocessamento automático
no estudo da evolução de margens estuarinas
(Estuário do Tejo)**

Alexandra Isabel Neves Amorim

Dissertação

Mestrado em Geologia do Ambiente,
Riscos Geológicos e Ordenamento do Território

2015

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Deteção remota e geoprocessamento automático
no estudo da evolução de margens estuarinas
(Estuário do Tejo)**

Alexandra Isabel Neves Amorim

Dissertação orientada por Doutora Fátima Cristina Gomes Ponte Lira
e Doutora Maria da Conceição Pombo de Freitas

Mestrado em Geologia do Ambiente,
Riscos Geológicos e Ordenamento do Território

2015

*"If we lived on a planet where nothing ever changed, there would be little to do.
There would be nothing to figure out. There would be no impetus for science.
And if we lived in an unpredictable world, where things changed in random
or very complex ways, we would not be able to figure things out.
But we live in an in-between universe, where things change,
but according to patterns, rules, or as we call them, laws of nature.
(...) And so it becomes possible to figure things out.
We can do science, and with it we can improve our lives."*

Carl Sagan, In: *Cosmos*, 1980

*"Man must rise above the Earth
- to the top of the atmosphere and beyond -
for only thus will he fully understand the World in which he lives."*

Socrates (469-399 BC)

RESUMO

Pretendeu-se com este trabalho criar um método de avaliação da evolução das morfologias e da ocupação de zonas marginais no Estuário do Tejo a mesoescala temporal, usando diferentes imagens de satélite do programa de observação terrestre Landsat e utilizando técnicas de processamento e análise de imagem em suporte SIG (Esri® ArcMap™ 10.1). As imagens Landsat compiladas (disponíveis gratuitamente em <http://earthexplorer.usgs.gov/>) abrangem o intervalo temporal de algumas décadas, suficientemente longo para o estudo da evolução deste tipo de elementos morfológicos, tendo sido selecionadas imagens das várias séries Landsat, entre as que combinam menor nebulosidade com menor altura de maré, de forma a exibirem a maior área possível de zona intertidal.

Para a área de teste, a Restinga do Alfeite, foram consideradas as principais classes de ocupação marginal local: “água”; “duna, praia e banco arenoso”, constituída por areia; “raso de maré externo e canais principais”, constituída por areia siltosa; “raso de maré interno”, constituída por silte argiloso; “sapal”, constituída por vegetação halófita em substrato vasoso orgânico; “vegetação dunar/ transição/ artificial”, constituída por áreas antropizadas (moinhos de maré e respetivas caldeiras, estradas, antigas secas de bacalhau, parques de estacionamento e equipamentos militares), árvores e vegetação herbácea dunar.

A atribuição das classes temáticas, definidas *a priori* aos diferentes níveis digitais (*píxeis*) da imagem, foi realizada usando o classificador estatístico assistido máxima verosimilhança, a partir do conhecimento prévio das assinaturas espectrais de cada classe de ocupação, definidas nas amostras de treino. O método foi validado por fotointerpretação de fotografia aérea, ortofotomapas e imagens Google Earth™, utilizando-se ainda cartografia antiga e levantamento topográfico com equipamento DGPS. Foram desenvolvidos modelos semiautomáticos com a ferramenta *Model Builder*, inserida no programa SIG utilizado, de forma a automatizar os diferentes processos, repetindo-os para as diferentes datas. A vetorização das diferentes classes permitiu definir a evolução de superfície de cada classe de ocupação, permitindo caracterizar qualitativa e quantitativamente a evolução da restinga e sua envolvente. A comparação entre as imagens classificadas permitiu identificar uma ligeira rotação do banco arenoso no sentido sinistrogiro e uma pequena redução da área ocupada pela classe “duna, praia e banco arenoso”, havendo poucas modificações nas classes “sapal” e “vegetação dunar/ transição/ artificial”.

A validação do modelo utilizado para a área de teste permitiu alargar o estudo a uma área mais abrangente, o estuário interior, aumentando-se também a quantidade de datas utilizadas na análise, embora com redução do número de classes, devido à maior complexidade do

processo de classificação numa área mais extensa e com maior variabilidade de elementos morfológicos.

Palavras-chave: deteção remota, geoprocessamento automático, Landsat, Estuário do Tejo, Restinga do Alfeite.

ABSTRACT

The intention of this work was to create a method for assessing the evolution of marginal areas and its morphologies and occupation, in a mesoscale temporal perspective, using GIS supported image processing and analysis techniques (Esri 10.1 ArcMap™) in different satellite images from the Landsat Earth-observation program. These images (available for free download at <http://earthexplorer.usgs.gov/>) cover some decades, long enough to study the evolution of such morphologic elements. Images were selected from several Landsat series, among the ones which combined lower cloudiness with lower tidal height, so as to exhibit the largest possible area of intertidal zone.

For the test area, the Alfeite spit, the main land cover classes of the estuary's marginal zone were considered: "water"; "dune, beach and sandbanks" (sand); "external mudflat and main channels" (muddy sand); "internal mudflat" (mud); "salt-marsh" (halophytic vegetation on organic mud); "dune vegetation/ transition/ artificial" (anthropized areas like tidal mills and its reservoirs, roads, ancient cod drying plants, car parking or military equipment, trees and other dune vegetation).

The assignment of thematic classes, defined *a priori* to the image's different digital levels (pixels), was performed using the statistical maximum likelihood supervised classifier, from the prior knowledge of the spectral signature of each occupation class, defined by the training samples. The method was validated by photo-interpretation on aerial photography, orthophotomaps and Google Earth™ images, complemented with ancient maps and DGPS topographic survey. The Model Builder tool, from the GIS software, allowed the development of models to automate the different processes and repeat them for different dates. Vectoring of different classes allowed the definition of the evolution of each occupation class, allowing qualitative and quantitative characterization of the sand spit and its surroundings' evolution. Comparison of categorized images shows a slight counter clock rotation of the sandbank and a slight reduction of the "dune, beach and sandbanks" area, with few changes in the "salt-marsh" and "dune vegetation/ transition/ artificial" classes.

Validation of this model for the test area allowed the broadness of this study to a wider area (the inner estuary), broadening also the amount of dates compared. The number of classes was however reduced, due to the larger complexity of the classification process in a wider area, with greater variability of morphological elements.

Keywords: remote sensing, automatic geoprocessing, Landsat, Tagus Estuary, Alfeite sand spit.

AGRADECIMENTOS

Às duas orientadoras deste trabalho, Doutora Fátima Cristina Lira e Doutora Maria da Conceição Freitas, agradeço, em primeiro lugar, a flexibilidade demonstrada na adaptação do tema da tese à minha vontade, fundindo os dois temas inicialmente propostos. O apoio, o interesse e a disponibilidade de ambas para resolver os problemas que foram surgindo, aliados às suas sugestões e críticas, foram essenciais para o desenvolvimento e conclusão da dissertação.

À Alexandra Oliveira agradeço a amizade e o incentivo inicial para realizar esta tarefa, para além do apoio na campanha de levantamento topográfico, dos ensinamentos na utilização do equipamento DGPS e em muitas das questões técnicas que foram surgindo. O seu altruísmo inspirador, a sua sinceridade e a sua vontade de transmitir conhecimentos contribuíram de forma importante para o desenvolvimento deste trabalho (e não só).

À Anabela Cruces agradeço a longa amizade, o incentivo, as dicas profissionais e pessoais e a inspiração que tem sido pelo seu incansável esforço na divulgação da ciência, pela simpatia, pelo altruísmo e pela paixão que demonstra em tudo o que faz.

À Vera Lopes agradeço a amizade, a simpatia, a inspiração e o empréstimo de algumas toneladas e gigabytes de bibliografia.

À Tânia Ferreira agradeço o exemplo de força e perseverança demonstrados no culminar do seu doutoramento, cuja mistura de energia, cansaço, desespero e alegria me inspiraram e mostraram ser possível ultrapassar mesmo as maiores dificuldades.

À Sandra Pereira que, embora sem contribuição direta neste trabalho, me transmitiu, durante anos, grande parte dos procedimentos técnicos laboratoriais na área da sedimentologia, ensinando-me a importância do rigor e da honestidade científicos, agradeço, não só os ensinamentos, mas uma longa e muito especial amizade.

À Sandra Moreira agradeço as dicas bibliográficas e o apoio nas fotografias da campanha de levantamento DGPS. Ao Professor César Andrade agradeço o empréstimo de alguma bibliografia. À Doutora Paula Freire agradeço a cedência da LMPMAVE (linha de máxima preia mar de águas vivas equinociais), realizada no âmbito do Projeto MorFeed. Ao Professor Rui Taborda agradeço a inspiração que me transmitiu ao longo de todo o curso de mestrado, pelo seu entusiasmo contagiante, simpatia, boa disposição, otimismo e versatilidade, simplificando o complicado e complicando o simples.

Aos professores César Andrade e Conceição Freitas agradeço todos os conhecimentos científicos que me transmitiram durante os últimos 17 anos, como professores e/ou orientadores, no campo, no laboratório e no gabinete. A sua forte dedicação ao estudo das zonas costeiras, a sua incansável forma de trabalhar e o seu conhecimento profundo de várias matérias científicas continuam a servir de inspiração e motivação na minha carreira.

Por fim agradeço à minha família, que me apoiou mais do que todos e sem a qual tudo isto teria sido impossível. Aos meus pais, por me terem ensinado os valores do trabalho, da dedicação, da honestidade e do respeito e por continuarem, ao fim de tanto tempo, a ajudar-me em todas as situações solicitadas, com maior ou menor dificuldade. Ao Miguel, por respeitar a minha decisão de continuar a minha progressão académica, à custa de um maior esforço da sua parte e da família. Aos meus dois pestinhas, por serem lindos e porque, apesar de tudo, poderia ter sido bem pior.

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	v
ABSTRACT	vii
AGRADECIMENTOS	ix
ÍNDICE GERAL	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	5
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
1.4 ESTADO DA ARTE.....	7
2. DETEÇÃO REMOTA.....	9
2.1 DEFINIÇÃO	9
2.2 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	10
2.3 SENSORES PARA DETEÇÃO REMOTA	12
2.3.1 Tipos de aplicação.....	12
2.3.2 Tipos de plataforma	13
2.3.3 Tipos de órbita (satélite)	13
2.3.4 Resolução temporal.....	14
2.3.5 Fonte de radiação.....	14
2.3.6 Resolução espacial.....	14
2.3.7 Resolução espectral	16
2.3.8 Resolução radiométrica	17
2.4 REFLETÂNCIA E ASSINATURA ESPECTRAL	17
2.4.1 Interação com a atmosfera	18
2.4.2 Interação com a água	19
2.5 IMAGENS DE SATÉLITE.....	20
2.6 PROGRAMA LANDSAT	22
2.6.1 Landsat 1, 2 e 3.....	23
2.6.2 Landsat 4 e 5.....	24
2.6.3 Landsat 6 e 7.....	24
2.6.4 Landsat 8.....	26
2.6.5 Órbitas Landsat	28
2.6.6 Imagens Landsat	28
2.7 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS	30
2.7.1 Pré-processamento	31
2.7.2 Processamento.....	32
Classificação	32
2.7.3 Pós-processamento.....	34
Avaliação da precisão da classificação.....	34
Filtros.....	35
2.7.4 Interpretação e Análise.....	36
2.8 GEOPROCESSAMENTO AUTOMÁTICO	36
3. MARGENS ESTUARINAS	39
3.1 ESTUÁRIOS.....	40

3.2	MARGEM.....	40
3.3	RASOS DE MARÉ.....	41
3.4	SAPAIS	43
3.5	PRAIAS ESTUARINAS	44
4.	ENQUADRAMENTO	45
4.1	GEOGRAFIA	45
4.2	GEOMORFOLOGIA E BIOLOGIA	47
4.2.1	Rasos de maré	48
4.2.2	Praias estuarinas	49
4.2.3	Sapais.....	50
4.2.4	Restinga do Alfeite e Sapal de Corroios	51
4.1	GEOLOGIA, HIDRODINÂMICA, GÉNESE E EVOLUÇÃO.....	54
4.2	HISTÓRIA	56
4.2.1	Restinga do Alfeite.....	56
5.	METODOLOGIA.....	61
5.1	ÁREA DE TESTE (RESTINGA DO ALFEITE).....	61
5.1.1	Delimitação da área de estudo	61
5.1.2	Calibração do modelo	62
	Google Earth™.....	62
	Ortofotomapas	63
	Fotografia aérea.....	64
	Levantamento topográfico.....	64
	Cartografia histórica	66
5.1.3	Escolha das imagens de satélite	69
5.1.4	Escolha das bandas espectrais	70
5.1.5	Pré-processamento das imagens	71
5.1.6	Processamento (Classificação)	75
5.1.7	Pós-processamento (Generalização).....	78
5.1.8	Avaliação da precisão da classificação.....	79
5.2	ESTUÁRIO DO TEJO	83
5.2.1	Área de estudo	84
5.2.2	Imagens.....	85
5.2.3	Pré-processamento.....	86
5.2.4	Processamento e pós-processamento.....	92
6.	RESULTADOS	93
6.1	RESTINGA DO ALFEITE	93
6.2	ESTUÁRIO DO TEJO	98
7.	ANÁLISE E DISCUSSÃO.....	101
7.1	RESTINGA DO ALFEITE	101
7.2	ESTUÁRIO DO TEJO	105
8.	CONCLUSÕES	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
	ANEXOS	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. (a) Subida do nível médio do mar global registada entre 1901 e 2010 (IPCC, 2013); (b) Projeções da subida do nível médio do mar global para o século XXI relativamente ao período 1986-2005 (adaptado de IPCC, 2013).....	2
Figura 1.2. Altimetria da região do Estuário do Tejo relativamente ao nível médio do mar atual (<i>Global Warming Art</i> , 2014).....	2
Figura 1.3. Tipificação da ocupação antrópica na orla estuarina (Freire et al., 2012).	3
Figura 1.4. Cartografia do intertidal do Estuário do Tejo (adaptado de Mendes et al., 2012).....	4
Figura 1.5. Diagrama representativo das etapas e objetivos do trabalho.....	5
Figura 1.6. Classificação assistida da costa no Estuário do Tejo para o ano 1995 (Correia, 2003).	8
Figura 1.7. Evolução do Banco emerso do Bugio (amarelo) para os anos de 1973 – 1999 (excerto de Lira e Taborda, 2013).	8
Figura 2.1. Elementos principais do processo de deteção remota (adaptado de Tindall, 2006).....	9
Figura 2.2. Campo eletromagnético (adaptado de Livescience, 2015).....	10
Figura 2.3. Espectro eletromagnético (adaptado de NASA, 2015); valores do comprimento da luz visível retirados de USACE (2003).	11
Figura 2.4. Órbita geoestacionária e órbita quase-polar (adaptado de SEOS, 2015).....	13
Figura 2.5. Campo de visão instantâneo (IFOV) definido pela amplitude da função de dispersão do ponto (PSF) (adaptado de Mather, 2004).	15
Figura 2.6. Tamanho relativo entre os píxeis de diferentes tipos de imagem de satélite (NASA, 2006 ^b).	15
Figura 2.7. Curva de refletância de uma folha de árvore: (a) de modo contínuo; (b) do modo que seria captado pelo sensor Landsat ETM+ (adaptado de Mather, 2004).	16
Figura 2.8. Imagem Landsat ETM+ de 2000 (pancromática): (a) com dois e (b) com 256 níveis de quantização.	17
Figura 2.9. Diferentes assinaturas espectrais para diferentes materiais (adaptado de NASA, 1999).	18
Figura 2.10. Processos que atuam sobre a luz solar na gama visível do espectro eletromagnético numa área de águas pouco profundas (adaptado de Mather, 2004).	20
Figura 2.11. Natureza matricial das imagens de satélite: (a) representação para uma banda; (b) representação para as oito bandas Landsat 7 (NASA, 2006 ^a).	21
Figura 2.12. Diferentes combinações de bandas ETM+ fazendo realçar diferentes objetos das imagens: (a) bandas 321; (b) bandas 432; (c) bandas 752 (adaptado de NASA, 2006 ^b).	21
Figura 2.13. Cronologia do Programa Landsat (Landsat Science, 2014).	22
Figura 2.14. (a) Satélite com os sensores Landsat 1 (Earth Observation Portal, 2015); (b) Esquema do sistema MSS e respetiva formação da imagem (Earth Observation Portal, 2015).	23
Figura 2.15. Esquema dos satélites Landsat 4 e Landsat 5 (adaptado de Earth Observation Portal, 2015).	24
Figura 2.16. Esquema do satélite Landsat 7 (Earth Observation Portal, 2015).	25
Figura 2.17. (a) Esquema do sistema SLC (NASA, 1999); (b) imagem Landsat 7 SLC-off de 11-3-2014.	25
Figura 2.18. Esquema do sensor OLI (Landsat Science, 2015).	26
Figura 2.19. Tipos de sensor: (a) mecânico; (b) push-broom (adaptados de Exelis, 2015).	26

Figura 2.20. Diferenças espectrais entre as bandas cobertas pelos diferentes sensores dos satélites Landsat 7 e Landsat 8 (adaptado de Landsat Science, 2014).....	27
Figura 2.21. Órbita polar do satélite Landsat: (a) esquema global (Mather, 2004); (b) esquema de passagens consecutivas (What-when-how, 2014).....	28
Figura 2.22. Organização das linhas de varrimento e dos píxeis numa imagem TM Landsat (adaptado de Sabins, 2000).....	29
Figura 2.23. Esquema da classificação assistida (adaptado de Chulalongkorn University, 2015).	33
Figura 2.24. Representação das classes radiométricas (ω_1 - ω_5) com os limites a tracejado e o ponto P a atribuir a uma classe (adaptado de Liu e Mason, 2009).	34
Figura 2.25. Esquema de uma matriz de confusão.	35
Figura 2.26. Aplicação de um filtro do tipo “Majority” com utilização dos 8 píxeis contíguos e limite de substituição com base em metade dos píxeis (ArcGIS Resource Center).	36
Figura 3.1. Componentes principais da morfodinâmica dos sistemas costeiros (adaptado de Masselink et al., 2011).....	39
Figura 3.2. Representação esquemática da linha da máxima preia-mar de águas vivas equinociais (LMPMAVE), do leito e da margem, de acordo com a Lei 54/2005 de 15 de novembro e o Decreto-lei 129/2008 de 21 de julho (Rilo et al., 2014).....	41
Figura 3.3. Elementos principais constituintes das margens estuarinas e respetivas distribuições sedimentar e altimétrica (adaptado de Masselink et al., 2011).	42
Figura 4.1. Localização da área de estudo: (a) em Portugal Continental (imagem Landsat completa); (b) Estuário do Tejo (com localização das divisões entre troços); (c) Baía do Seixal e rios Coina e Judeu; (d) Restinga do Alfeite e Sapal de Corroios (composição das bandas 4,3,2 de imagem Landsat 8, em ArcMap 10.1 TM).	46
Figura 4.2. (a) Vista para o canal do Rio Judeu, a partir da praia do Seixal, de SSW para NNE; (b) Localização e orientação da foto com indicação dos cais fluviais do Barreiro e do Seixal.	47
Figura 4.3. Modelo Digital de Terreno da restinga (Guerreiro, 2013 ^b).	51
Figura 4.4. Distribuição dos sedimentos na Baía do Seixal (Freire, 2003).	53
Figura 4.5. Plantas mais comuns no Sapal de Corroios: (a) Halimione portulacoides; (b) Sarcocornia fruticosa; (c) Spartina maritima: aspeto geral à esquerda e pormenores à direita (Flora On, 2014).	53
Figura 4.6. Localização dos quatro moinhos de maré da Restinga do Alfeite (Raposo et al., 2013).....	57
Figura 4.7. Moinhos de maré e respetivas caldeiras, de W para E: (a) e (e) Moinho do Galvão; (b) e (f) Moinho do Capitão; (c) e (g) Moinho da Passagem; (d) e (h) Moinho da Torre (imagens a a d : Google Maps TM 2013; foto e : MyGuide, 2014; fotos f a h : IGESPAR, 2014).	58
Figura 4.8. Representações antigas da Restinga do Alfeite: (a) 1874- Diário Ilustrado, Nabais (1986), com localização da Quinta Real do Alfeite; (b) 1810-1811 - Mapa das Linhas de Torres Vedras (Linhas de Torres Vedras, 2014).	58
Figura 4.9. (a) Zona da antiga seca do bacalhau (Panoramio, 2014); (b) Aspeto dos materiais da estrada e da vegetação dunar arbórea.....	59
Figura 4.10. Excerto da primeira página da Gazeta dos Caminhos de Ferro de 16-7-1903.....	59
Figura 4.11. Antiga ponte sobre o Rio Judeu (Farol da nossa terra, 2015).	60
Figura 4.12. Arsenal do Alfeite: (a) Zona afetada; (b) Construção entre 1928 e 1937.	60
Figura 5.1. Polígono correspondente à área de estudo, ferramenta de corte (construída com a ferramenta Model Builder do ArcMap 10.1 TM) e imagem cortada resultante.....	62
Figura 5.2. Sequência de imagens do Google Earth TM para Agosto de 2002; Agosto de 2004; Março de 2007 e Julho de 2012.	63
Figura 5.3. Ortofotomapa de 2007.....	63
Figura 5.4. Vetorização da praia (1958) e do banco de areia (1955) sobre fotografias aéreas.	64

Figura 5.5. Levantamento DGPS dos bancos de areia. Imagem base OLI compósita com as bandas 432 (cor verdadeira) de 10/10/2013.....	65
Figura 5.6. Cartografia antiga com indicação da localização da Restinga do Alfeite no ano de 1634 (Atlas de Pedro Teixeira, Barra y puerto de la ciudad de Lisboa, in Campo Arqueológico de Tavira, 2014).	66
Figura 5.7. (a) 1878, Plano Hydrographico do Porto de Lisboa (Biblioteca Nacional, levantado em 1845-1847); (b) 1862, Carta Chorographica dos Terrenos em Volta de Lisboa (Biblioteca Nacional). .	67
Figura 5.8. Georreferenciação (a) e vetorização (b) do Plano Hydrographico do Porto de Lisboa (Biblioteca Nacional, levantado em 1845-1847) em ArcMap 10.1™.	68
Figura 5.9. Comparação de duas imagens Landsat 8, uma com alguma nebulosidade e pouca superfície intertidal visível (a) e outra com as condições necessárias para ser escolhida para este estudo (b) (EarthExplorer, 2014).	69
Figura 5.10. Esquema do modelo de pré-processamento para a imagem OLI de 2013, que pode aplicar-se também às imagens de 1991 e 2001, alterando-se as bandas 4, 5 e 6 para 3, 4 e 5.....	71
Figura 5.11. Utilização das bandas OLI 4, 5, 6 e 7 (Landsat 8) para criação de uma imagem compósita, com recurso à ferramenta Model Builder do ArcMap 10.1™.	72
Figura 5.12. Utilização da Gap Mask disponibilizada pelo USGS para retirar das imagens SLC-off as linhas resultantes da avaria no SLC.	73
Figura 5.13. Esquema do modelo de pré-processamento para as imagens SLC-off.	74
Figura 5.14. Classes escolhidas para o zonamento da restinga, sobre imagem Google Earth™ atual....	75
Figura 5.15. Amostras de treino para a imagem compósita de 2013 (OLI, bandas 4, 5, 6 e 7).....	76
Figura 5.16. Classes geradas pelo classificador máxima verosimilhança para a imagem compósita de 2013.....	77
Figura 5.17. Imagem resultante da aplicação tripla do filtro generalização na imagem classificada da Figura 5.16	78
Figura 5.18. Modelo para as fases de processamento (classificação) e de pós-processamento (generalização), construído com a ferramenta Model Builder do ArcMap 10.1™.....	79
Figura 5.19. (a) Ground truth sob a forma de polígonos vetorizados por fotointerpretação sobre a imagem OLI Landsat de 2013 (banda 8); (b) Os mesmos polígonos, com exclusão de 15 metros nos seus limites (buffer).	80
Figura 5.20. Modelo criado para preparar as diferentes classes para a contagem dos píxeis na determinação da precisão da classificação, com a classe “restinga” a representar a classe “vegetação dunar/transição/artificial”	81
Figura 5.21. Classificações individuais resultantes da aplicação das máscaras de corte definidas pelo ground truth e contagem de píxeis para cada classe.	82
Figura 5.22. Exemplo de edição dos limites para a área de estudo: (a) a vermelho, a LMPMAVE, que excluiria algumas das estruturas importantes neste estudo; (b) a verde, o limite após aplicação do buffer de 50 metros e ajuste manual.	85
Figura 5.23. Modelo de pré-processamento inicial para o corte das imagens OLI (bandas 4567).	87
Figura 5.24. Modelo de pré-processamento para corte das imagens ETM+ SLC-off pelo limite do estuário, com exclusão das linhas de erro, seguido da classificação inicial para excluir a área imersa e pela composição das imagens.	88
Figura 5.25. Imagem SLC-off de 2012 (banda 4).	88
Figura 5.26. Aplicação de um “stretch” na imagem cortada da banda 3 de 1991.....	89
Figura 5.27. Refletâncias da água limpa a azul claro e da água turva a verde escuro (USGS Spectral Viewer, In: USGS, 2014).	89
Figura 5.28. Imagem OLI de 2013 (banda 5), classificada de modo não assistido, para retirar as zonas inundadas e criar duas classes: emersa e imersa. (a) imagem original; (b) imagem classificada; (c) polígonos emersos resultantes.	90

Figura 5.29. Modelo de pré-processamento para excluir as zonas imersas.....	91
Figura 5.30. (a) Imagem compósita de 2013 com as amostras de treino para a zona emersa do estuário; (b) imagem classificada generalizada do mesmo ano, com fundo de cor preta na zona imersa..	92
Figura 6.1. Ficheiros de assinatura sobrepostos às imagens compósitas dos anos 2013, 2007, 2001 e 1991.....	93
Figura 6.2. Imagens classificadas generalizadas em formato matricial para os anos 2013, 2007, 2001 e 1991.....	94
Figura 6.3. Proporções de ocupação das diferentes classes em 1991, 2001, 2007 e 2013, após aplicação do filtro generalização.....	95
Figura 6.4. Sobreposição da classe “duna, praia e banco arenoso” em diferentes datas, desde 1845-47 até 2013.....	96
Figura 6.5. Polígonos da classe “duna, praia e banco arenoso” de várias datas sobrepostos à imagem compósita de 2013 (bandas OLI 432 - cor verdadeira) e quantificação das áreas respetivas.....	97
Figura 6.6. Imagem compósita 2013, zona emersa com os polígonos de treino, imagem classificada, imagem classificada generalizada e respetiva quantificação.....	98
Figura 7.1. Zona dos bancos arenosos com o levantamento DGPS sobreposto às imagens: (a) compósita 432 de 2013 (com filtro Pan-sharpening); (b) compósita 4567 de 2013; (c) classificada de 2013; (d) classificada de 2013 com triplo filtro generalização (Majority Filter).	102
Figura 7.2. Zona dos bancos arenosos com o levantamento topográfico de 2014 sobreposto às imagens: (a) compósita 3457 de 1991; (b) classificada de 1991; (c) classificada de 1991 com triplo filtro generalização.	102
Figura 7.3. Esquema evolutivo da zona dos bancos arenosos a leste da Restinga do Alfeite (adaptado de Freire, 2003).	104
Figura 7.4. Sobreposição da classe “duna, praia e banco arenoso” em diferentes datas, sobre a imagem de cor verdadeira (OLI 432) de 2013, com indicação do movimento de avanço da concavidade da praia.....	105
Figura 7.5. Pormenor da classificação na imagem de 2013, com indicação da LMPMAVE (a vermelho) e da LMPMAVE+50m (a azul): (a) imagem Google Earth™ de 11/03/2007; (b) imagem compósita Landsat 4567; (c) imagem classificada; imagem classificada com 3 filtros generalização.	106
Figura 7.6. Pormenor da classificação na imagem de 2013, com indicação da LMPMAVE (a vermelho) e da LMPMAVE+50m (a azul): (a) imagem Google Earth™ de 08/07/2012; (b) imagem compósita Landsat 4567; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada com 3 filtros generalização. ...	107
Figura 7.7. Imagens classificadas generalizadas dos anos 1984 e 1997 e respetivos valores absolutos e relativos de ocupação do solo.	108
Figura 7.8. Imagens classificadas generalizadas dos anos 1984 e 2003 e respetivos valores de ocupação do solo.	110
Figura 7.9. Evolução da zona do raso areno-vasoso a norte da Restinga do Alfeite, entre 1984 e 2003 (imagens compósitas com as bandas 3457 em cima e imagens classificadas generalizadas em baixo).	110
Figura 7.10. Evolução da zona do Sapal de Corroios entre 1984, 2003 e 2013 (imagens compósitas com as bandas 3457).	111
Figura 7.11. Evolução na zona do Canal do Montijo entre 1984 e 2003 (imagens compósitas com as bandas 3457 e imagens classificadas generalizadas).	111
Figura 7.12. Evolução na zona do Sapal de Pancas entre 1984 e 2003 (imagens compósitas com as bandas 3457 e imagens classificadas generalizadas), com representação do limite do sapal de 1984 na imagem classificada de 2003.....	112
Figura 7.13. Imagem compósita de 2003 (bandas 3457) com sobreposição da linha de delimitação do sapal de 1984.	112
Figura 7.14. Imagens classificadas generalizadas dos anos 1991 e 2000 e respetivos valores de ocupação do solo.	113

Figura 7.15. Imagens classificadas generalizadas dos anos 1978 e 2008 e respetivos valores de ocupação do solo.	114
Figura 7.16. Evolução na zona do Sapal de Pancas entre 1978 e 2008: imagem compósita de 2008 com as bandas 3457, com representação do limite do sapal de 1978.	114
Figura 7.17. Representação da classe “sapal” sob a forma de polígonos.	115
Figura 7.18. Contornos da classe sapal para todos os anos analisados, com pormenores nas zonas do Mouchão da Póvoa (a) , do Sapal de Pancas (b) , da Base Aérea do Montijo (c) e do Sapal de Corroios (d)	116

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1. Imagens selecionadas e respetivas características.	70
Tabela 5.2. Matriz de confusão para avaliar a precisão do método de classificação.....	83
Tabela 5.3. Imagens selecionadas e respetivas características.	86
Tabela 5.4. Bandas utilizadas na composição das imagens.....	91
Tabela 6.1. Proporções de áreas ocupadas pelas diferentes classes, antes e após aplicação do filtro generalização.	95
Tabela 6.2. Resultados quantitativos de ocupação para todas as datas analisadas.	99
Tabela 7.1. Tabela 6.2 reordenada por número de píxeis emersos.	109

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A importância económica, social e ecológica das zonas costeiras, sobejamente reconhecida, reflete-se na forte pressão exercida sobre elas, com mais de metade da população mundial a viver a menos de 100 km de distância da costa (Coastal Care, 2014). O espaço reclamado e antropizado de forma não controlada ao longo dos últimos séculos, sob pressão urbana, industrial, portuária, turística e agrícola, tem colocado em risco o equilíbrio natural do sistema litoral, nomeadamente os domínios biológico e geológico. A artificialização das margens diminui a capacidade de migração dos diferentes ambientes como medida de adaptação a agentes forçadores naturais, impedindo o restabelecimento do equilíbrio natural por parte do sistema.

Aliadas à pressão antrópica, surgem as alterações climáticas, com a consequente aceleração da subida do nível médio do mar (NMM) e a possibilidade de uma maior frequência de eventos climáticos extremos, aumentando a vulnerabilidade das zonas costeiras e estuarinas. De acordo com o mais recente relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), as recentes alterações climáticas provocaram impactos nos sistemas natural e humano, aumentando as temperaturas atmosférica e oceânica, diminuindo as quantidades de neve e gelo e provocando a subida do NMM (IPCC, 2014). O mesmo Painel refere que o intervalo entre 1983 e 2012 terá sido o período mais quente dos últimos 1400 anos no hemisfério norte e que a temperatura superficial global combinada de continentes e oceanos terá aumentado 0,85 °C entre os anos 1880 e 2012. Também se conclui, neste quinto relatório, (AR5) que a precipitação aumentou nas zonas de latitudes médias do hemisfério norte desde 1901 e que as águas mais salinas terão aumentado a sua salinidade e as menos salinas terão diminuído este teor. Relativamente ao NMM global, conclui-se que subiu entre 17 e 21 cm entre 1901 e 2010 (**Figura 1.1.a**), com uma taxa de subida, desde meados do século XIX, superior à taxa média verificada durante os dois milénios precedentes. As projeções do mesmo Painel para a subida do NMM em 2100, relativamente ao período de referência de 1986-2005, apontam para um valor entre 52 e 98 cm, para o cenário RCP8.5 (**Figura 1.1.b**). O mesmo relatório refere alterações na frequência e tipo de eventos extremos desde 1950, com ênfase no aumento de eventos extremos relacionados com temperaturas quentes, aumento de níveis extremamente elevados do mar e aumento de episódios de precipitação extrema em certas regiões, prevendo-se que cerca de 70 % das linhas de costa mundiais venham a sofrer os efeitos de oscilações de ± 20 % relativamente ao NMM global.

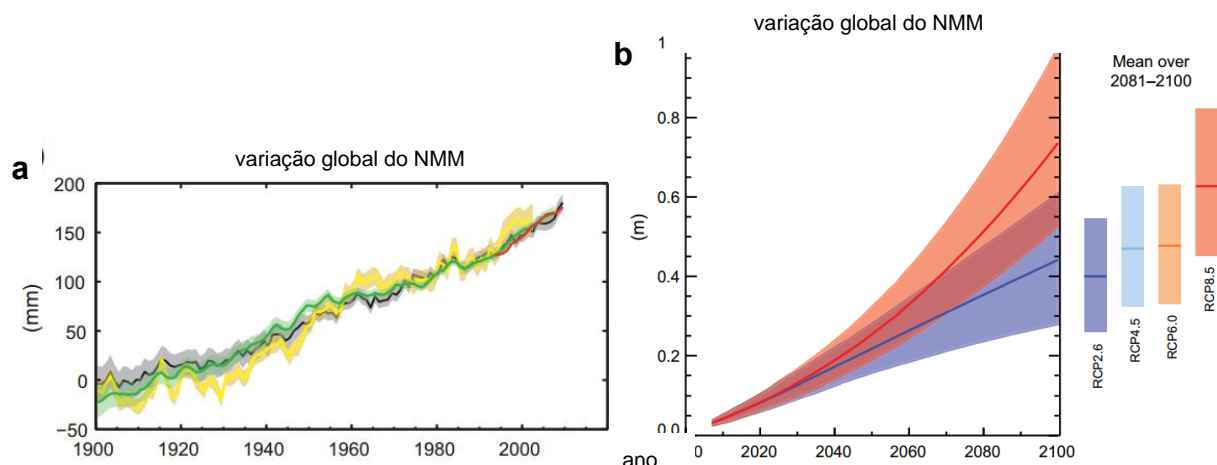


Figura 1.1. (a) Subida do nível médio do mar global registada entre 1901 e 2010 (IPCC, 2013); (b) Projeções da subida do nível médio do mar global para o século XXI relativamente ao período 1986-2005 (adaptado de IPCC, 2013).

Paralelamente ao IPCC, diversas entidades têm contribuído para a avaliação e divulgação dos efeitos das alterações climáticas e variações do NMM, entre elas o *website Global Warming Art*, que na sua página *Sea Level Rise Explorer* mostra um mapa global, de resolução razoável (90 m), que representa o grau de vulnerabilidade das regiões costeiras à subida do NMM. O caso particular do Estuário do Tejo apresenta-se como uma zona bastante vulnerável, com a maior parte da sua superfície abaixo dos 12 metros relativamente ao NMM (**Figura 1.2**).

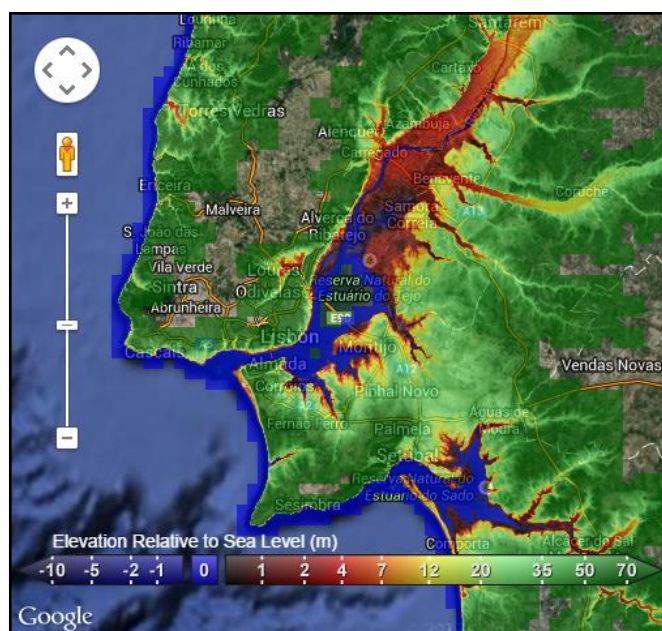


Figura 1.2. Altimetria da região do Estuário do Tejo relativamente ao nível médio do mar atual (Global Warming Art, 2014).

Os estuários representam excelentes casos de estudo na temática das alterações climáticas, por serem ambientes de transição muito vulneráveis, devido à interação entre os fatores físicos, químicos, biológicos e antrópicos a que estão sujeitos, aliada à sua importância socioeconómica e interesse ecológico. Em particular, as praias e restingas estuarinas (e, consequentemente, os elementos morfológicos que delas dependem, como os sapais e os rasos de maré), resultantes da acumulação de sedimentos arenosos sob ação de ondas de geração

local e correntes de maré, são particularmente sensíveis às pequenas modificações ambientais, como sejam a subida do nível médio do mar ou a alteração das suas fontes sedimentares.

O Estuário do Tejo é um bom exemplo de todas estas características, por albergar nas suas margens, por um lado, a capital do país e seus arredores (com todas as infraestruturas e pressões associadas ao seu funcionamento) e, por outro, a mais importante e extensa zona húmida do país, considerada uma das dez mais importantes da Europa (Evoa, 2015), pelos seus habitats naturais, que permitem albergar uma grande diversidade de espécies de aves migradoras e residentes.

No caso particular do Estuário do Tejo, a perigosidade de fenómenos de inundação nas margens surge associada à combinação dos efeitos da subida do NMM com momentos de marés vivas (preia-mares mais elevados) e com o efeito de ressonância, que faz crescer a amplitude da maré no interior do estuário, e que será fortalecido pela subida do NMM (Guerreiro et al., 2013). A estes podem acrescentar-se os eventos de *storm surge*, definidos como a sobre-elevação do nível do mar resultante de condições atmosféricas anómalas, medida pela diferença entre o nível observado e a altura da maré astronómica prevista, que pode atingir dimensões métricas na costa portuguesa (Taborda e Dias, 1992), sofrendo atenuação no interior do estuário devido ao alargamento da secção. O aumento da frequência destes fenómenos terá, entre outros, o efeito de salinização dos terrenos férteis nas regiões agrícolas, na zona montante do estuário.

O risco associado a estes fenómenos acresce da natureza muito antropizada de grande parte das margens do estuário, com 58% destas ocupadas por espaços urbanos, industriais, portuários e aeroportuários e 35 % ocupadas por espaços agrícolas (Freire et al., 2012), perfazendo um total antropizado de 93 % do total do perímetro marginal (**Figura 1.3**), deixando apenas 7 % de áreas naturais ou verdes.

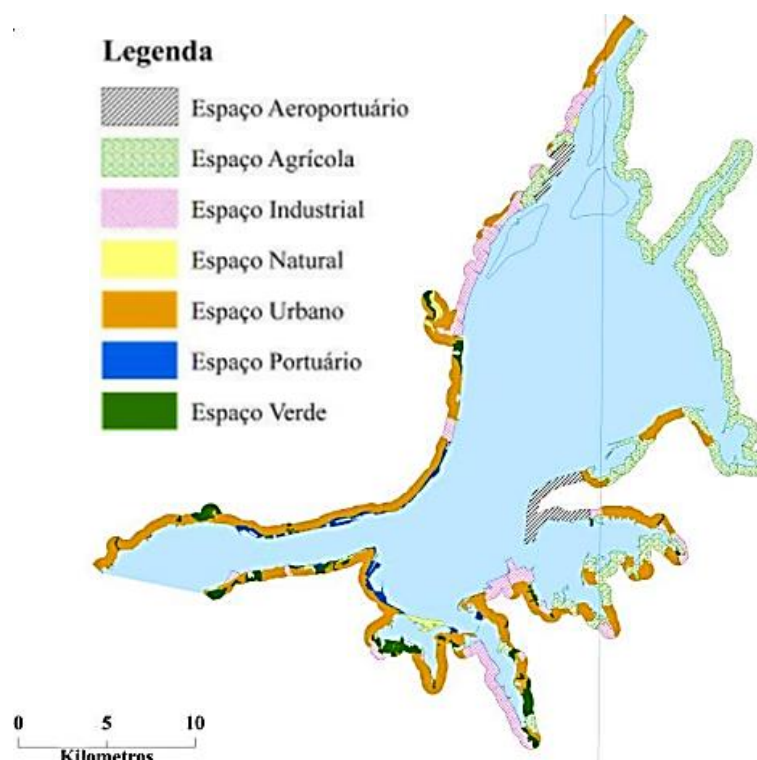


Figura 1.3. Tipificação da ocupação antrópica na orla estuarina (Freire et al., 2012).

Saliente-se a existência de alguma extensão da margem ocupada por infraestruturas industriais e antigos estaleiros, alguns deles abandonados, ocupados por materiais tóxicos que serão adicionados ao leito do estuário em caso de inundação.

Cerca de 43 % da superfície total do estuário (**Figura 1.4**) é ocupada por zonas intertidais (Mendes et al., 2012). O desaparecimento ou redução das zonas de sapal e raso de maré, que funcionam como dissipadores da energia das ondas e das marés, poderá também contribuir para aumentar o risco de inundação nas margens do estuário.

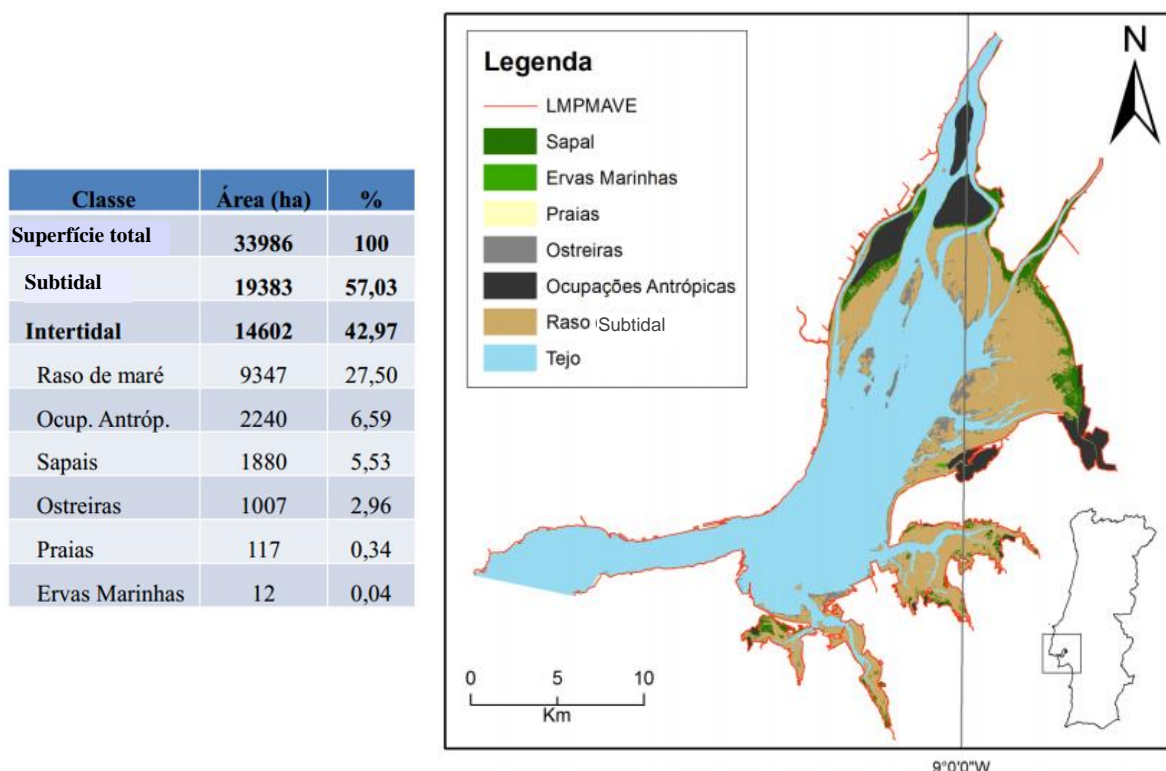


Figura 1.4. Cartografia do intertidal do Estuário do Tejo (adaptado de Mendes et al., 2012).

A elevada e complexa dinâmica associada aos ambientes de transição, o seu reconhecido valor ambiental e a sua importância socioeconómica, exigem sistemas de monitorização da evolução dos diferentes suportes morfológicos e sedimentares sob influência dos agentes forçadores.

A democratização da informação geográfica, em particular a disponibilização de forma gratuita na Internet de imagens de satélite de grande resolução, tem permitido usar a deteção remota como uma ferramenta de análise da evolução das zonas costeiras e estuarinas, contribuindo para estudos de projeção do seu comportamento futuro, imprescindível nas ferramentas de planeamento e gestão. Numa perspetiva de conhecimento do passado para projetar o futuro, o uso destas ferramentas permitirá melhorar o conhecimento do sistema costeiro.

1.2 OBJETIVOS

Pretende-se com este trabalho analisar a evolução morfológica das margens naturais do Estuário do Tejo à escala das décadas (mesoescala), desenvolvendo modelos semi-automáticos de pré-processamento e classificação de imagens de satélite Landsat. Partindo de uma metodologia desenvolvida, testada e validada na área de teste, a Restinga do Alfeite, alargar-se-á posteriormente a área geográfica a todo o estuário interior, com ênfase na margem sul, adensando-se e estendendo-se também o intervalo temporal.

Para apoiar a classificação, será feita fotointerpretação sobre imagens Google Earth™, ortofotomapas e fotografias aéreas georreferenciadas, para além de dados obtidos através de levantamento DGPS, que auxiliarão na delimitação de diferentes classes. Paralelamente, será utilizada cartografia antiga georreferenciada para observar alterações morfológicas anteriores às da cobertura Landsat.

Os resultados da análise obtida e os modelos desenvolvidos poderão ser, no final, publicados em plataforma de partilha de informação geográfica, como por exemplo o ArcGIS Online (**Figura 1.5**).

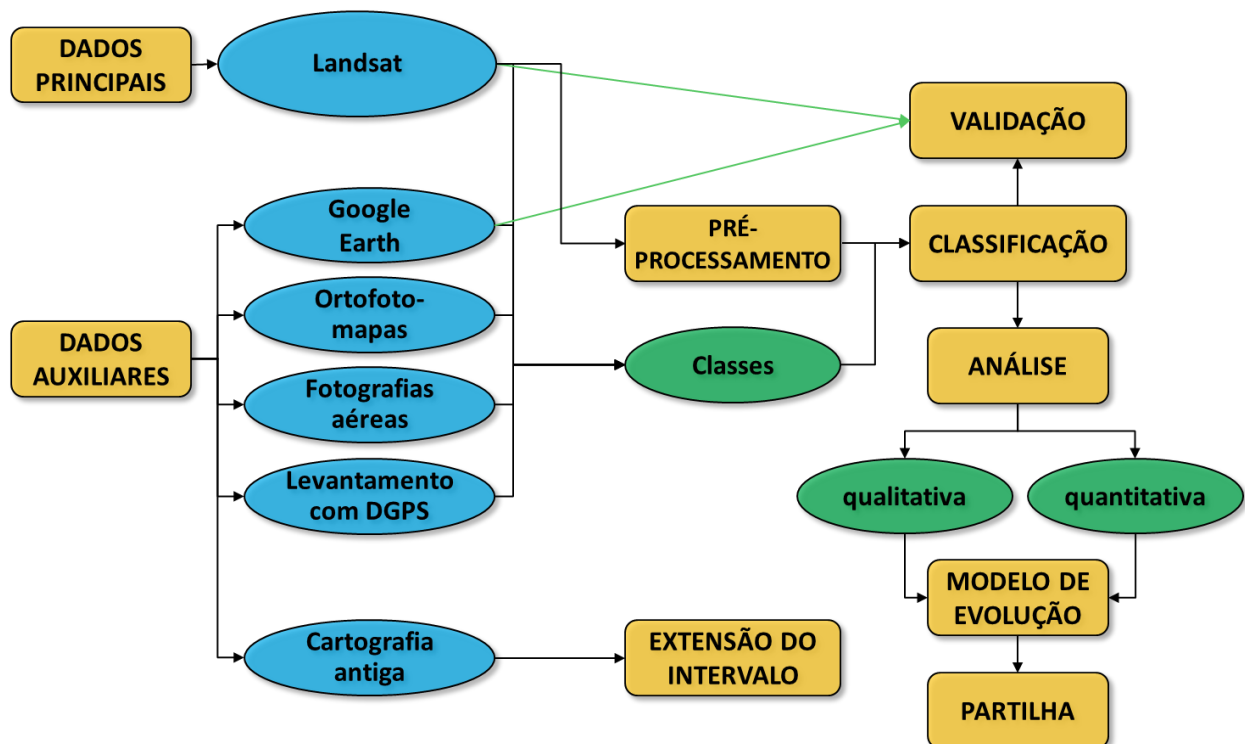


Figura 1.5. Diagrama representativo das etapas e objetivos do trabalho.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho apresenta, no seu primeiro capítulo, uma introdução focada essencialmente nos motivos da escolha deste tema e desta região, com ênfase na questão das consequências da subida do nível médio do mar, seguida de uma breve síntese dos objetivos do estudo e do estado da arte.

O segundo capítulo faz uma introdução teórica aos fundamentos da Deteção Remota, uma descrição geral do programa Landsat e um resumo das técnicas de geoprocessamento automático utilizadas geralmente em análise de imagens de satélite.

Segue-se, no terceiro capítulo, uma breve caracterização das diferentes morfologias habitualmente presentes em margens estuarinas.

O quarto capítulo descreve de modo geral as características geográficas, geomorfológicas, biológicas, geológicas, hidrodinâmicas, genéticas, evolutivas e históricas do Estuário do Tejo e, em mais pormenor, da Restinga do Alfeite (que funcionou como área de teste, ou área piloto), obtidas essencialmente através de consulta bibliográfica de vários trabalhos realizados nesta área de estudo.

No quinto capítulo são descritas as diferentes metodologias utilizadas, começando pela definição da área de teste, a Restinga do Alfeite, com referência aos elementos auxiliares utilizados na definição das várias classes de ocupação, às diversas opções tomadas e ao pré-processamento. Descreve-se o método de classificação e o pós-processamento das imagens, incluindo o método de validação do modelo de classificação. Apresentam-se os modelos criados para aplicação dos métodos à área de teste e, por fim, são aplicados os mesmos modelos a toda a área do estuário interior do Tejo e a um intervalo temporal mais alargado.

No sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos para a Restinga do Alfeite e o Estuário do Tejo, seguidos da sua análise e discussão no capítulo 7 e das conclusões finais, no oitavo capítulo.

Nos anexos listam-se as características das imagens utilizadas, as imagens classificadas para todas as datas analisadas e os resultados quantitativos das classificações.

A redação do texto respeita as normas do Novo Acordo Ortográfico, com consulta do conversor da página Web da Porto Editora (<http://www.portoeditora.pt/acordo-ortografico/conversor-texto/>). As referências bibliográficas respeitam a norma portuguesa NP 405, harmonizada com a norma internacional ISO 690 (Instituto da Educação, 2012 e Universidade de Aveiro, 2015). Os produtos finais (ficheiros de imagem *Esri ArcMap™* de formato *shapefile*, *raster*, *toolbox*, etc.) apresentam metadados de acordo com a diretiva INSPIRE.

1.4 ESTADO DA ARTE

Grande quantidade de trabalhos foram já realizados na área da deteção remota e da automatização de procedimentos em Sistemas de Informação Geográfica aplicados à ocupação e uso dos solos e ao estudo evolutivo de sistemas espaço-temporais constituídos por elementos morfológicos naturais:

- Ryu et al. (2002) descreveram uma metodologia para extração da linha de água em zonas extensas de rasos de maré, referindo a dificuldade do classificador na distinção entre refletâncias semelhantes, devido à grande quantidade de água existente, não só nos próprios sedimentos do raso, mas também retida nas cavas das marcas de corrente durante a vazante;
- Pinto (2008) classificou imagens de satélite do sensor IRS P6/ LISS III pelo algoritmo da máxima verosimilhança, para derivar um mapa de uso do solo para 2006 com 6 classes, com o objetivo de simular o crescimento urbano no trecho entre Ovar e Mira, na zona de Aveiro;
- A evolução da ocupação e uso do solo em zonas húmidas associadas à Lagoa Negombo, no Sri Lanka, foi estudada por Rebelo et al. (2009), no âmbito do inventário Ramsar de zonas húmidas, utilizando métodos de classificação assistida pelo método da máxima verosimilhança em imagens Landsat TM de 1992 e 2002. A classificação resulta em ambiguidades entre a classe “arbustos” e as classes “pântano” e “áreas húmidas”;
- Oliveira (2009) caracterizou e monitorizou as classes de uso do solo na costa sul da Ilha de S. Miguel (Açores) com recurso a imagens de satélite.
- Klemas (2011) utiliza métodos de classificação assistidos e não assistidos em imagens ETM+ (Landsat 7) no mapeamento de uso de solos em Chesapeake Bay, com o objetivo de analisar a evolução de vegetação e hidrologia em zonas húmidas;

No caso específico de aplicação de técnicas de deteção remota e geoprocessamento no estudo espaço-temporal do Estuário do Tejo também já foram realizados estudos, embora de menor cobertura temporal e/ou espacial do que no presente trabalho:

- Freire (2003) estudou a evolução do Estuário do Tejo à micro e à mesoescala, recorrendo principalmente a análise sedimentológica e a modelos numéricos, mas com uma componente de comparação cartográfica e fotográfica. Este trabalho e os respetivos resultados serão referidos por diversas vezes na presente dissertação;
- Correia (2003) utilizou técnicas de classificação assistida para monitorizar a evolução do uso do solo no Estuário do Tejo, para os anos 1958, 1985 e 1995, com recurso a fotografia aérea e imagens de satélite (**Figura 1.6**);

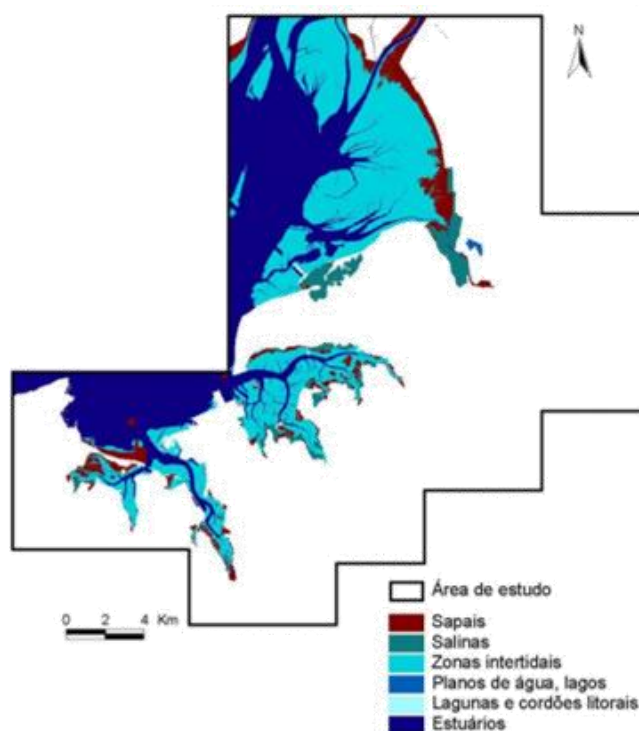


Figura 1.6. Classificação assistida da costa no Estuário do Tejo para o ano 1995 (Correia, 2003).

- Mendes et al. (2012) no projeto Morfeed realizaram a cartografia do intertidal utilizando deteção remota sobre ortofotomapas e uma imagem Landsat, para tipificação da cartografia de habitats do Estuário do Tejo, quantificando as diferentes ocupações para o ano de 2009 (**Figura 1.4**);

- Lira e Taborda (2013) analisaram a evolução do Banco de Areia emerso do Bugio, na embocadura do rio Tejo, com recurso a imagens Landsat das décadas de 70, 80, 90 do século XX e da primeira década do século XXI, por extração da linha de costa definida pela interface terra-água, usando uma metodologia de diferença entre bandas (**Figura 1.7**).

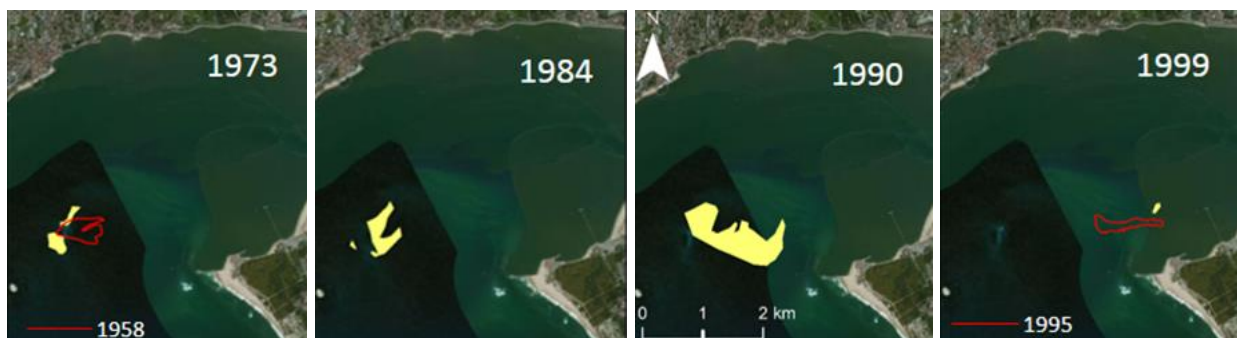


Figura 1.7. Evolução do Banco emerso do Bugio (amarelo) para os anos de 1973 – 1999 (excerto de Lira e Taborda, 2013).

2. DETEÇÃO REMOTA

2.1 DEFINIÇÃO

A interação entre a radiação eletromagnética e os diferentes objetos ou materiais à superfície da Terra depende de variados fatores, internos ou externos a esses objetos, que determinam a resposta dos mesmos a essa radiação.

A deteção remota define-se geralmente como um conjunto de técnicas de aquisição, processamento e análise de imagens da superfície do planeta, captadas por sistemas de satélite ou meios aéreos (USACE, 2003). As imagens possuem informação captada sob a forma de energia ou radiação eletromagnética refletida ou emitida pela superfície terrestre ou pelos objetos nela existentes, codificada por sensores que detetam variações naquela radiação, em diferentes zonas do espectro eletromagnético (**Figura 2.1**).

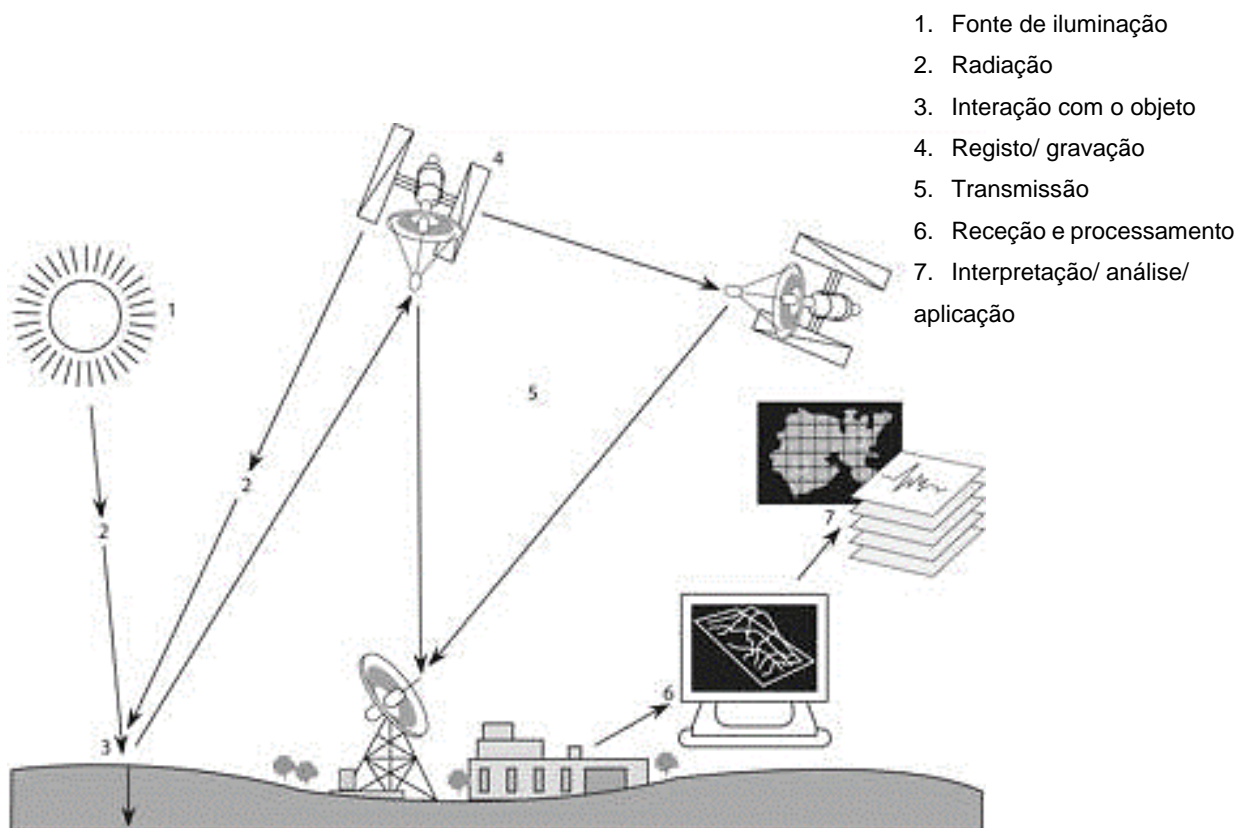


Figura 2.1. Elementos principais do processo de deteção remota (adaptado de Tindall, 2006).

2.2 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A radiação eletromagnética consiste na combinação de dois campos, elétrico e magnético, que se comportam como ondas, propagando-se perpendicularmente entre si e relativamente à direção do movimento geral do campo eletromagnético (**Figura 2.2**).

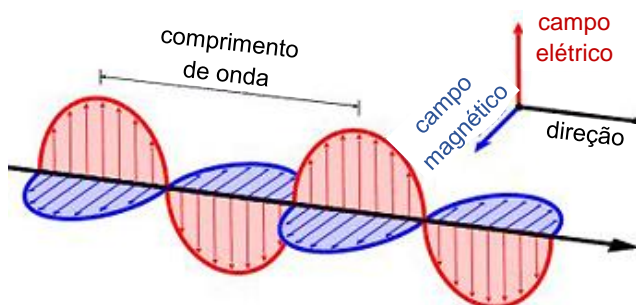


Figura 2.2. Campo eletromagnético (adaptado de Livescience, 2015).

Todos os objetos cuja temperatura seja superior ao zero absoluto, ou seja, -273°C , emitem radiação, que viaja à velocidade da luz, ou seja, aproximadamente 3×10^8 metros por segundo no vácuo, sendo inferior em meios como a atmosfera ou a água, devido ao índice de refração destes (Mather, 2004). O conjunto de todas as ondas eletromagnéticas designa-se por espectro eletromagnético (**Figura 2.3**) e inclui comprimentos de onda (distância entre os picos de duas ondas consecutivas) desde os raios gama, na ordem dos 10^{-13} metros, às ondas de rádio, na ordem dos 100 metros, sendo que a luz detetada pelo olho humano abrange apenas os comprimentos entre $0,39 \mu\text{m}$ (violeta) e $0,78 \mu\text{m}$ (vermelho). Para maiores comprimentos de onda verificam-se menores frequências, representadas por ciclos por segundo ou por *hertz*, que definem o tipo de interação com os diferentes objetos ou elementos à superfície do planeta.

A radiação eletromagnética proveniente do Sol, ao chegar ao nosso planeta, é parcialmente absorvida pela atmosfera (cerca de 17% da radiação) e pelos materiais à superfície da Terra (cerca de 47% da radiação), sendo os restantes 35% refletidos pela superfície da Terra, pela atmosfera e pelas nuvens (Mather, 2004). Estes valores são médias, estando a quantidade e o tipo de radiação solar que atinge a superfície do planeta dependentes das condições atmosféricas e do comprimento de onda analisado. A interação entre a atmosfera e a radiação eletromagnética resulta do carácter corpuscular desta, que, funcionando como um feixe de partículas (fótons), sofre absorção por parte dos átomos e moléculas constituintes da atmosfera (Mather, 2004). A absorção de certas gamas de comprimentos de onda do espectro por parte da atmosfera funciona como filtro para a maior parte das radiações nocivas (principalmente das mais curtas, como os raios gama, os raios X e os ultravioletas), permitindo a existência de vida na Terra.

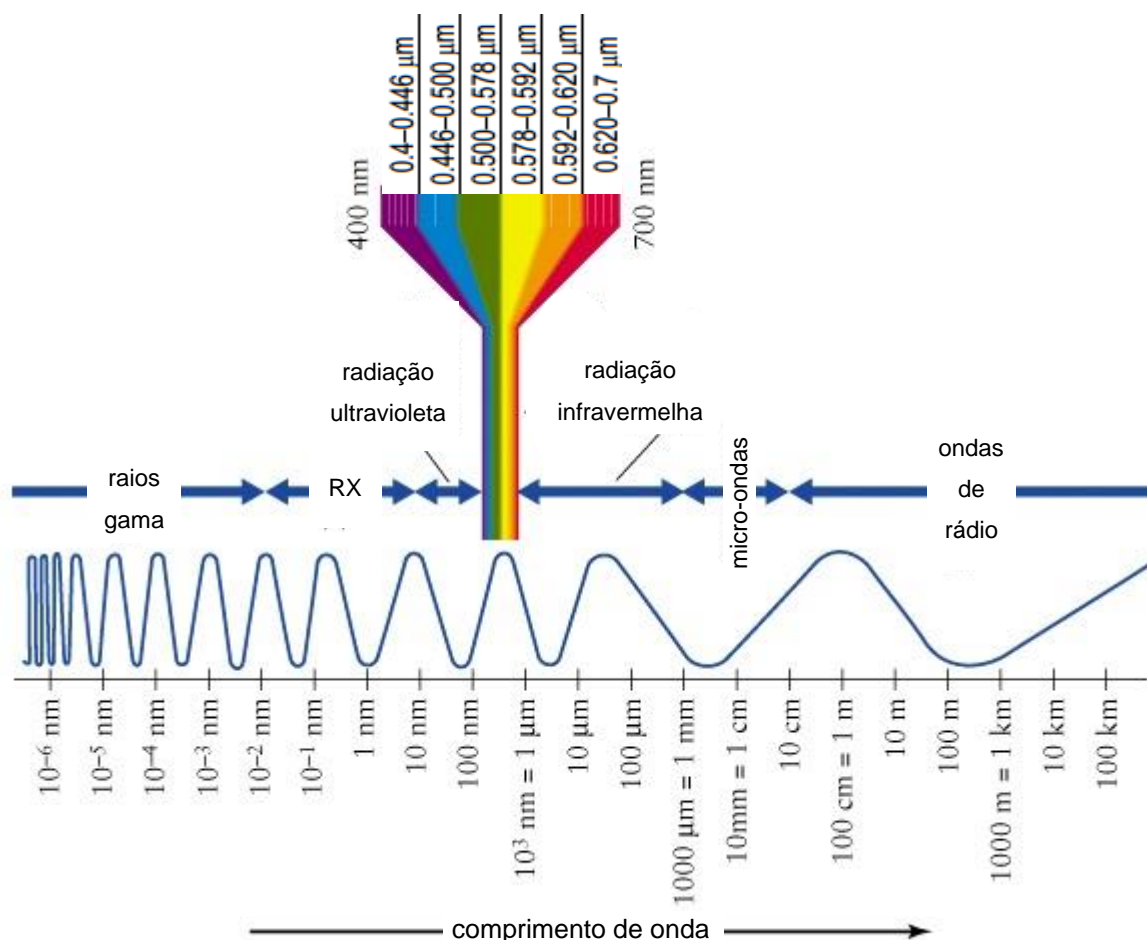


Figura 2.3. Espectro eletromagnético (adaptado de NASA, 2015); valores do comprimento da luz visível retirados de USACE (2003).

A interação entre a luz solar e os objetos à superfície da Terra depende, não só das características da luz ao atingir os objetos, mas também da natureza dos mesmos, podendo ter diferentes comportamentos: a luz pode transmitir-se através deles (sendo refratada pelos mesmos); pode ser absorvida (sendo seguidamente emitida sob a forma de calor); pode sofrer dispersão (sendo arbitrária a direção de propagação da energia) e pode ser refletida, sendo a cor do objeto dependente do comprimento de onda refletido (NASA, 1999). O mesmo objeto pode refletir, refratar, absorver e emitir energia em simultâneo, em diferentes proporções.

A maior parte da radiação emitida ou refletida pelos objetos não é detetada pelo olho humano (**Figura 2.3**), podendo no entanto ser registada por sensores específicos para cada intervalo do espectro eletromagnético. As radiações de comprimento ligeiramente superior ao da cor vermelha visível (entre os 0,7 e os 3 μm), designadas por infravermelhas próximas (NIR – *near infrared* ou SWIR – *short-wavelength infrared*), comportam-se como a luz visível, sendo igualmente refletidas pelos objetos e consideradas bandas óticas (Mather, 2004). As radiações

infravermelhas entre os 3 μm e os 100 μm comportam-se como calor, sendo consideradas bandas infravermelhas térmicas, que por serem parcialmente absorvidas pela atmosfera, permitem o seu aquecimento (efeito de estufa) e, conseqüentemente, a existência de vida na Terra (Mather, 2004). Radiações acima deste comprimento (entre 1 mm e 3 m) designam-se por micro-ondas e no intervalo entre 3 e 25 cm têm a capacidade de atravessar as nuvens (Mather, 2004). No extremo oposto do espectro, com menores comprimentos de onda, situam-se as radiações ultravioleta, os raios X e os raios gama, com maiores níveis energéticos e comportamento mais associado ao das partículas do que ao das ondas, mais afetado pelos afeitos atmosféricos de absorção e dispersão, não sendo por isso nenhum destes intervalos utilizado para deteção remota por satélite (Mather, 2004).

2.3 SENSORES PARA DETEÇÃO REMOTA

A deteção remota iniciou-se aquando das primeiras fotografias aéreas, captadas em balão perto de Paris em 1858 pelo fotógrafo francês Gaspard Tournachon (Klemas, 2009). Ter-se-á desenvolvido depois, principalmente para fins militares, associada a outros tipos de plataforma (essencialmente aviões), com câmaras mais sofisticadas e registando também bandas do infravermelho. O desenvolvimento da fotografia digital terá representado um grande avanço nas técnicas de captação de imagens à distância, que ganharam precisão e rapidez no envio e processamento, cobrindo maiores intervalos do espectro eletromagnético. A partir dos anos 60 do século XX surgiram os satélites equipados com sistemas de sensores eletro-óticos, aumentando os tipos de utilização da deteção remota a muitas outras áreas, para além da militar, entre elas a agricultura, a silvicultura, a deteção de incêndios, o planeamento do uso dos solos, o mapeamento de zonas húmidas, a meteorologia e a oceanografia.

Existe atualmente um grande número de tipos de sensores para utilização em deteção remota, adaptados a diferentes finalidades, podendo ser classificados essencialmente pelos tipos de aplicação e de radiação utilizada e pelo carácter ativo/passivo do sensor (Klemas, 2009), sendo também distinguidos pelo tipo de plataforma de suporte, pelo tipo de órbita (no caso dos satélites) e pelo tipo de resolução (espacial, espectral, temporal e radiométrica).

2.3.1 Tipos de aplicação

Em termos de tipo de aplicação, a maioria dos sensores regista e produz imagens bidimensionais, que podem ser utilizadas para cartografia e produção de mapas, pelo que se

designam, em inglês, por “*imagers*” ou “*mappers*”. Incluem-se neste grupo as fotografias analógicas e digitais, as matrizes multiespectrais (imagens de satélite) e alguns tipos de Radar (SAR - *Synthetic Aperture Radar* - e SLAR – *Sidelooking Airborne Radar*) (Klemas, 2009). Em outras aplicações incluem-se os radiómetros, que medem a energia radiante; os espectrómetros, que medem a distribuição energética no espectro de forma contínua; ou os “*profilers*”, que medem distâncias aos objetos, permitindo recolher informação topográfica ou batimétrica (caso dos radares ou do LIDAR) (Klemas, 2009).

2.3.2 Tipos de plataforma

Os sensores para deteção remota, inicialmente desenvolvidos para fins militares, foram evoluindo para outros fins, e para instalação em diferentes tipos de plataforma, podendo atualmente estar fixos ao solo (caso das câmaras digitais de monitorização de ondas), transportados em aeronaves ou balões (câmaras para produção de fotografias aéreas), ou em órbita em torno do planeta, a bordo de satélites artificiais. Estes últimos permitem a cobertura repetitiva e cíclica da superfície terrestre, navegando em vários tipos de órbita, consoante o fim a que se destinam as imagens captadas.

2.3.3 Tipos de órbita (satélite)

Os sensores montados em satélites com órbitas geoestacionárias, a altitudes aproximadamente de 36000 km e com velocidades que lhes permitem manter a mesma posição relativamente à superfície do planeta, recolhem continuamente informação em áreas específicas de grandes dimensões (exemplo dos satélites meteorológicos). Quando montados em órbitas quase-polares (planos ligeiramente inclinados relativamente ao eixo da Terra), síncronas solares, que permitem cobrir a maior parte da superfície terrestre (à exceção das zonas junto aos polos), passam no mesmo local a intervalos constantes (que definem a sua resolução temporal), aproximadamente à mesma hora do dia (mantendo, desta forma, o mesmo ângulo de incidência da fonte de luz relativamente aos objetos), cobrindo menores extensões por imagem do que os geoestacionários, mas permitindo captar maior detalhe (**Figura 2.4**).

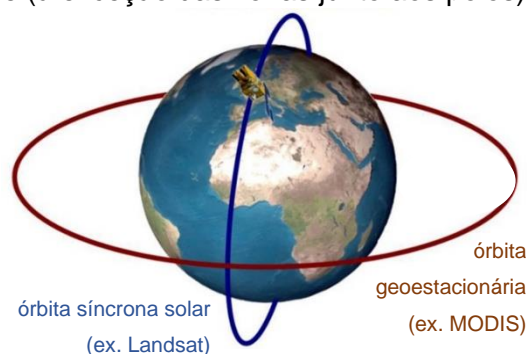


Figura 2.4. Órbita geoestacionária e órbita quase-polar (adaptado de SEOS, 2015).

2.3.4 Resolução temporal

O tipo de plataforma que sustenta o sensor condiciona a sua resolução temporal, sendo esta definida pela frequência de captação das imagens consecutivas no mesmo local. Sensores montados em estruturas fixas que captam imagens de vídeo para monitorizar praias ou ondas têm resolução temporal na ordem dos segundos, muito superior à dos sensores em órbita, em satélites, que captam imagens com espaçamento de alguma horas ou mesmo semanas para o mesmo local. Adicionalmente a resolução temporal diz respeito à cobertura temporal do programa de aquisição, ou seja, o intervalo entre o início e o fim do período de cobertura.

2.3.5 Fonte de radiação

Os sensores podem classificar-se como passivos ou ativos, consoante a fonte de radiação seja natural (geralmente a luz do Sol) ou artificial (emitida pelo sensor). No primeiro caso incluem-se os sensores óticos, que captam a radiação refletida pelos objetos, nos intervalos do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (de que são exemplo as fotografias aéreas ou as imagens Landsat), ou a informação térmica emitida pelos mesmos, no intervalo infravermelho (esta última permitindo adquirir dados noturnos). Incluem-se também neste caso os sensores de micro-ondas que registam este tipo de radiação naturalmente presente nos objetos. No segundo caso, os sensores ativos, incluem-se os que emitem e recebem as radiações de micro-ondas, de que são exemplo os sensores de RADAR (*RAdio Detection And Ranging*), SAR (*Synthetic Apperture Radar*) ou LIDAR (*Light Detecting And Ranging*).

2.3.6 Resolução espacial

De forma simplificada e puramente geométrica, a resolução espacial obtida por um sensor refere-se à quantificação da superfície terrestre que é representada por cada célula ou píxel da imagem, designada por IFOV (*instantaneous field of view*, ou campo de visão instantâneo), que está diretamente relacionada com a distância da plataforma à superfície observada (sensores mais distantes captam imagens de maiores dimensões, embora menos detalhadas). No entanto, sendo esta distância ligeiramente variável, originam-se variações no IFOV e, consequentemente, na resolução espacial das imagens obtidas (no caso dos sensores Landsat 1-3, a distância do satélite pode variar entre 880 e 940 km de altitude na sua órbita polar, fazendo variar o IFOV entre 76 e 81 m (Mather, 2004)).

Outra forma de definir a resolução espacial baseia-se no poder de resolução do sensor, ou seja, na sua capacidade de distinguir dois pontos distintos no seu campo de visão, o que significa que a resolução espacial não depende apenas da distância da plataforma ao objeto, sendo uma característica do próprio sensor. O poder de resolução depende também do brilho relativo entre objetos distintos na imagem, resultante das propriedades óticas envolvidas na criação da imagem, sendo que o brilho de cada píxel depende de uma distribuição do tipo Gaussiano da intensidade do brilho dos objetos (designada por PSF, ou *point spread function*, ou seja, função de distribuição do ponto), não se baseando apenas na média das intensidades de todos os objetos incluídos nesse píxel (**Figura 2.5**). A amplitude da PSF aumenta para objetos mais claros presentes no campo de visão instantâneo do sensor, aumentando o brilho dessa área relativamente às áreas envolventes, o que permite que objetos de elevado contraste mas de tamanho inferior à resolução sejam visíveis, e que objetos de maior dimensão mas de menor contraste não o sejam (Mather, 2004). A resolução espacial de 30 metros das imagens Landsat TM e ETM+ baseia-se nesta noção de resolução espacial, que inclui a PSF (Mather, 2004).

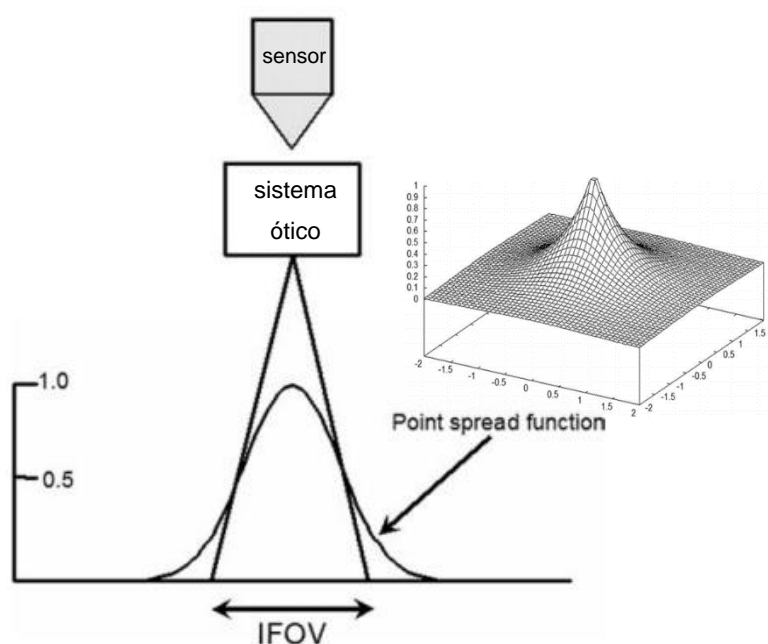


Figura 2.5. Campo de visão instantâneo (IFOV) definido pela amplitude da função de dispersão do ponto (PSF) (adaptado de Mather, 2004).

Em termos gerais, a resolução espacial pode ser de ordem quilométrica (resolução espacial baixa, presente nos sensores adaptados a estudos globais ou continentais, geralmente de âmbito meteorológico ou oceanográfico, como o MODIS, transportado pelos satélites norte-americanos Terra e Aqua); da ordem das centenas ou dezenas de metros (resolução espacial média a alta, presente nos sensores norte-americanos Landsat e no europeu SPOT); sendo considerada muito alta quando inferior a 5 metros (resolução das imagens multiespectrais dos sensores Quickbird, Ikonos e GeoEye) (**Figura 2.6**).

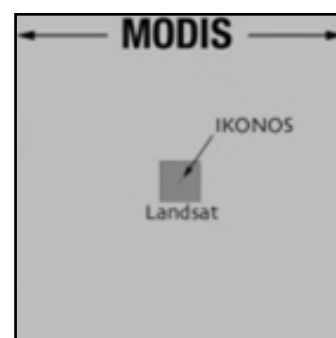


Figura 2.6. Tamanho relativo entre os píxeis de diferentes tipos de imagem de satélite (NASA, 2006^b).

2.3.7 Resolução espectral

A resolução espectral refere-se à capacidade do sensor de distinguir os diferentes intervalos de comprimento de onda do espectro eletromagnético (refletindo-se na quantidade de bandas que consegue registar), sendo tanto maior quanto menores forem os intervalos registados. Quantifica-se pelas larguras das bandas espectrais, medidas em micrómetros (μm) ou nanómetros (nm).

Grande parte dos sensores que registam as gamas do visível e do infravermelho fazem-no sob a forma de multi-bandas, ou imagens multiespectrais, individuais, cada uma representando um intervalo espectral discreto. Classificam-se em monoespectrais ou pancromáticos, quando registam apenas uma banda; multiespectrais quando captam até 10 bandas; superespectrais se captam mais de 10 bandas e hiperespectrais quando apresentam mais de 100 bandas estreitas, permitindo maior distinção entre diferentes objetos, com base na sua resposta espectral, obtendo-se maior continuidade entre os diferentes comprimentos de onda. O exemplo da **Figura 2.7** ilustra a diferença entre resolução espectral elevada (com dados quase contínuos) e resolução espectral baixa (*broad-band*), com os mesmos dados, mas apresentados em intervalos de banda discretos, aos quais escapam diferenças subtis nas refletâncias.

A posição no espectro eletromagnético e a largura e o número de bandas determinam o grau de discriminação dos diferentes objetos presentes numa imagem multiespectral, de forma que a utilização de imagens multiespectrais proporciona um maior grau de poder de discriminação dos objetos do que cada banda individual (Mather, 2004). No entanto, quanto maior a resolução espectral, menor a quantidade de brilho captada pelo sensor, para o mesmo nível de ruído de fundo, aumentando assim a relação entre ruído e força do sinal (Mather, 2004).

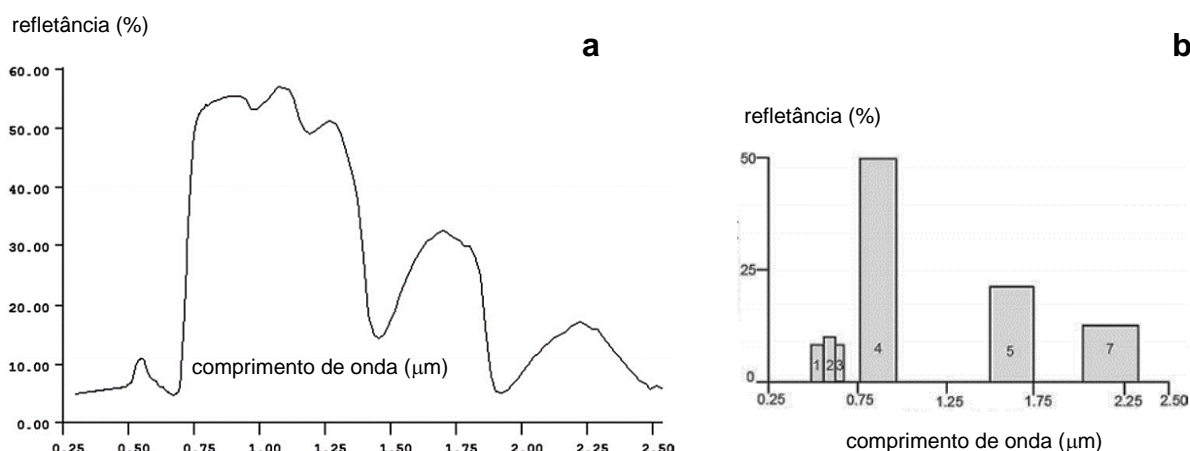


Figura 2.7. Curva de refletância de uma folha de árvore: **(a)** de modo contínuo; **(b)** do modo que seria captado pelo sensor Landsat ETM+ (adaptado de Mather, 2004).

2.3.8 Resolução radiométrica

A resolução radiométrica descreve a capacidade do sensor de distinguir diferentes objetos no mesmo intervalo do espectro eletromagnético, sendo definida pelos níveis de quantização utilizados numa imagem uni-banda, ou seja, pela quantidade de níveis de cinzento apresentados, diretamente proporcional ao nível de detalhe obtido pelo sensor. Desta forma, um sensor que regista apenas dois níveis de intensidade obterá imagens a preto e branco, de muito baixa resolução radiométrica, enquanto um sensor que registe 256 níveis de cinzento obterá imagens com resolução razoável (**Figura 2.8**). O número de níveis é geralmente expresso num formato de base binária, cujo expoente representa o número de bits necessários para armazenar a informação, sendo que a imagem a preto e branco ocupa apenas um bit e a imagem com 256 níveis de quantização ocupa 8 bits e resulta do resultado do expoente 2^8 .

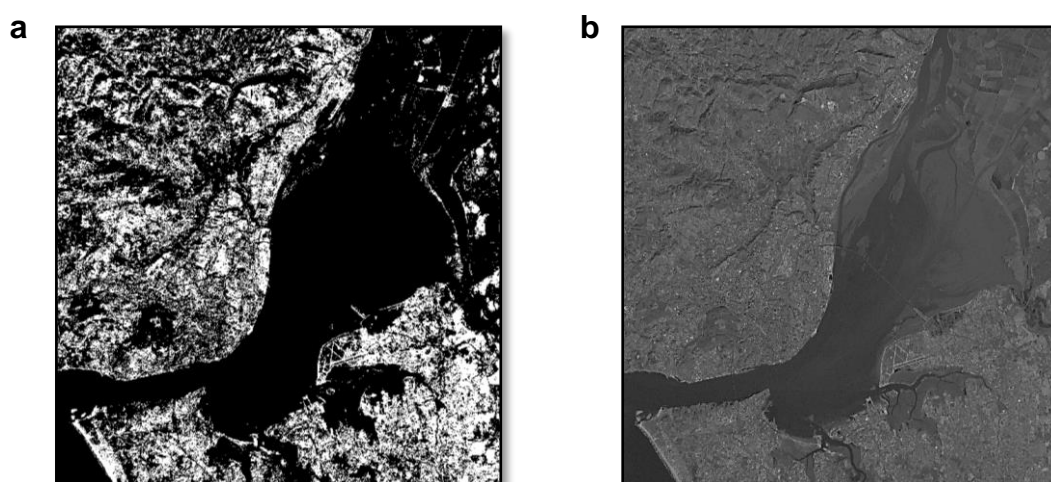


Figura 2.8. Imagem Landsat ETM+ de 2000 (pancromática): **(a)** com dois e **(b)** com 256 níveis de quantização.

2.4 REFLETÂNCIA E ASSINATURA ESPECTRAL

A razão entre a energia refletida pelos objetos e a energia incidente neles designa-se por refletância e depende, principalmente, do intervalo do espectro eletromagnético analisado, ou seja, do comprimento de onda. Depende também do ângulo de incidência da luz (que depende da hora do dia e da estação do ano, no caso da luz solar), da natureza do corpo e das suas características físicas. Cada objeto ou material é único do ponto de vista espectral, possuindo o seu próprio padrão de refletância nas diferentes bandas do espectro eletromagnético, ou seja, a sua própria assinatura espectral, que pode variar ao longo do tempo, como é o caso da vegetação ao longo das estações do ano. Analisando as refletâncias de determinados elementos da superfície terrestre em diferentes intervalos do espectro eletromagnético obtém-se a assinatura espectral desses elementos, que permite distingui-los entre si (**Figura 2.9**).

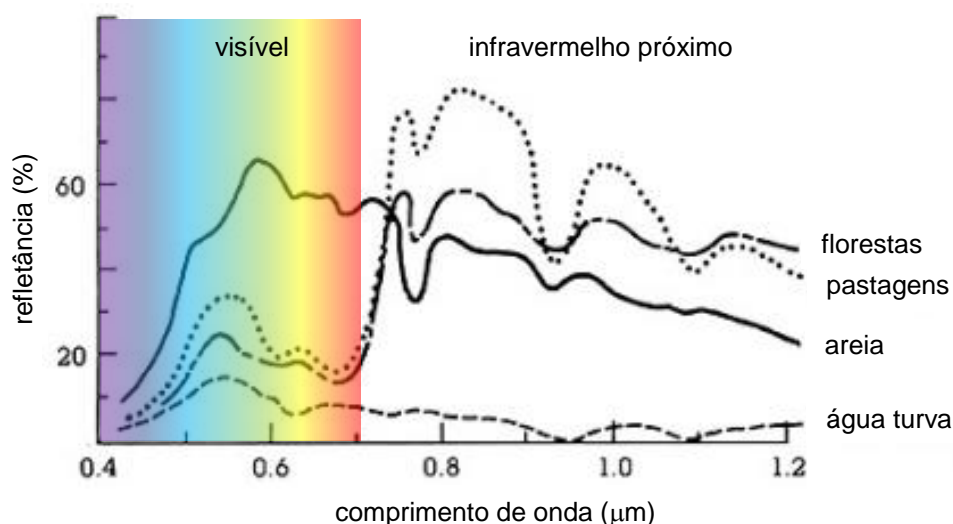


Figura 2.9. Diferentes assinaturas espectrais para diferentes materiais (adaptado de NASA, 1999).

Os exemplos da **Figura 2.9** mostram que a vegetação apresenta assinatura espectral muito diferente dos restantes materiais, com picos na zona do infravermelho próximo, resultantes do seu mecanismo de defesa que reflete a totalidade das ondas neste intervalo para evitar o sobreaquecimento das folhas. É possível distinguir entre diferentes espécies vegetais e até entre diferentes estádios evolutivos ou níveis de saúde recorrendo a técnicas de análise da assinatura espectral das plantas (dependendo da resolução espectral do sensor utilizado), que podem contribuir, indiretamente, para estudos geológicos, pois a vegetação varia consoante o tipo de substrato. É também possível analisar a presença de determinados minerais ou tipos de rocha numa região através das assinaturas espectrais dos elementos presentes nesses materiais. A humidade nos solos e a quantidade de matéria orgânica influenciam a sua capacidade de reflectância (Mather, 2004).

2.4.1 Interação com a atmosfera

Os mecanismos de absorção atmosférica dependentes do comprimento de onda da radiação alteram a quantidade de luz solar que atinge a superfície do planeta (Mather, 2004), principalmente na gama dos menores comprimentos de onda, em que a dispersão da luz é maior, prejudicando a visibilidade das imagens de satélite (Drury, 1990). O problema da interação com a atmosfera é geralmente agravado no caso dos sensores de satélite, pelo facto de a luz ter de atravessar duas vezes antes de chegar ao sensor, sofrendo duplamente os efeitos dessa interação.

A dispersão não seletiva afeta todas as zonas do espectro eletromagnético e é produzida por partículas presentes na atmosfera, superiores a 10 μm de raio (Mather, 2004). Agrava-se para maiores concentrações de partículas ou gases na atmosfera, como sejam sal evaporado, pó ou fumo, ou mesmo a chuva, todos eles variáveis no tempo e no espaço. Esta variabilidade gera diferentes níveis de dispersão atmosférica para diferentes imagens, tornando difícil a comparação entre imagens de diferentes datas e entre diferentes zonas na mesma imagem.

A dispersão seletiva, que atua apenas em intervalos específicos do espectro eletromagnético, é mais forte nas ondas de menor comprimento, como é o caso da zona do azul visível, que é a que mais dispersão sofre, o que explica a cor azul do céu (Mather, 2004). Existem no entanto intervalos do espectro em que os efeitos da atmosfera são mais subtis, designados por “janelas atmosféricas”, em que a radiação sofre menos absorção e dispersão, situadas nas gamas entre 0,3 e 1,3 μm (visível /infravermelho próximo), 1,5 a 1,8 μm , 2,0 a 2,5 μm e 3,5 a 4,1 μm (infravermelhos médios) e 7 a 15 μm (banda térmica do infravermelho) (Mather, 2004).

2.4.2 Interação com a água

No percurso desde o Sol até à superfície da água, parte da radiação sofre dispersão, sendo esta detetada pelo sensor; a restante incide sobre a água, sendo parcialmente refletida pela superfície (**Figura 2.10**). A restante é parcialmente absorvida pela água (dependendo do intervalo do espectro considerado), seletivamente absorvida pelos materiais dissolvidos, ou sofre dispersão pelas partículas em suspensão, sendo esta dispersão proporcional à concentração de partículas (Mather, 2004).

A refletância da água é afetada pela presença de materiais em suspensão e pela profundidade da coluna de água, sendo a sua assinatura espectral indicativa da concentração destes materiais e da profundidade. Na zona dos infravermelhos próximos a refletância da água limpa é quase nula (Mather, 2004), havendo reflexão quase exclusivamente nas zonas espectrais entre o azul e o verde. A profundidade a que a radiação visível penetra neste meio depende dos níveis de turbidez, sendo que grandes cargas de sedimentos em suspensão aumentam a refletância, tornando a água indistinguível dos materiais dos fundos (Mather, 2004).

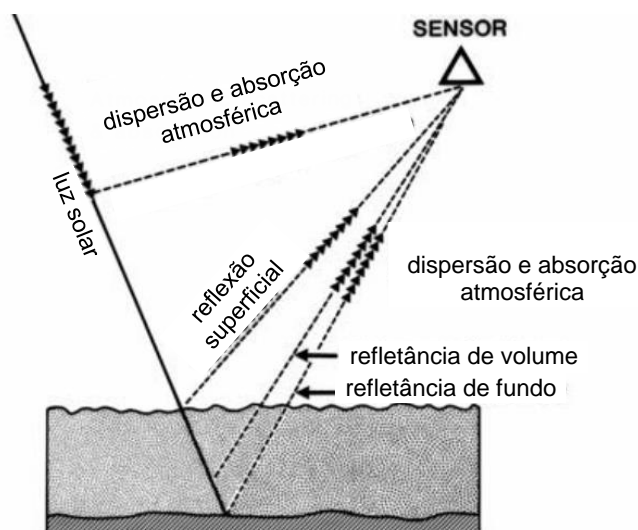


Figura 2.10. Processos que atuam sobre a luz solar na gama visível do espectro eletromagnético numa área de águas pouco profundas (adaptado de Mather, 2004).

2.5 IMAGENS DE SATÉLITE

Cada imagem recolhida por um sensor é captada com base num determinado intervalo espectral. A maior parte dos sensores passivos de observação da Terra adquire imagens multiespectrais ou pancromáticas, que abrangem várias gamas do espectro eletromagnético, essencialmente a partir da radiação refletida pelos objetos (representativa da sua cor e, conseqüentemente, da sua composição química ou mineralógica), sob iluminação solar. As imagens multiespectrais consistem em diferentes imagens uni-banda em tons de cinzento, enquanto a imagem pancromática consiste numa imagem com alcance radiométrico maior, cobrindo uma grande parte do intervalo do infravermelho próximo (Liu e Mason, 2009). As bandas térmicas (de que é exemplo a banda 6 do sensor ETM+ Landsat 7), adquiridas por sensores térmicos, também passivos, representam energia emitida em vez de refletida (não necessitando de luz solar na sua aquisição), em comprimentos de onda dez vezes superiores aos do infravermelho, geralmente com menor resolução espacial (Liu e Mason, 2009). As bandas de micro-ondas, captadas por sensores de Radar, permitem inferir acerca da textura e do teor de humidade das superfícies registadas (Mather, 2004).

A informação contida nas imagens de satélite apresenta-se geralmente sob a forma de píxeis cuja intensidade de cinzento representa um Número Digital (DN ou *Digital Number*) que varia entre 0 e 255 (no caso de imagens com resolução radiométrica de 8 bits, como é o caso das imagens Landsat 7) ou entre 0 e 4095 (em imagens com 12 bits de resolução radiométrica, como é o caso das imagens Landsat 8). O DN corresponde, aproximadamente (embora não

totalmente – ver 2.3.6), à média dos valores de refletância registados na área representada pelo respetivo píxel, para o comprimento de onda analisado. Os DN correspondentes a diferentes bandas, para o mesmo píxel, permitem definir a assinatura espectral (ver 2.4) do objeto representado por esse píxel. A natureza matricial das imagens de satélite permite trabalhá-las matematicamente e quantificar diferentes aspetos da natureza dos objetos e materiais representados, utilizando programas específicos (Figura 2.11).

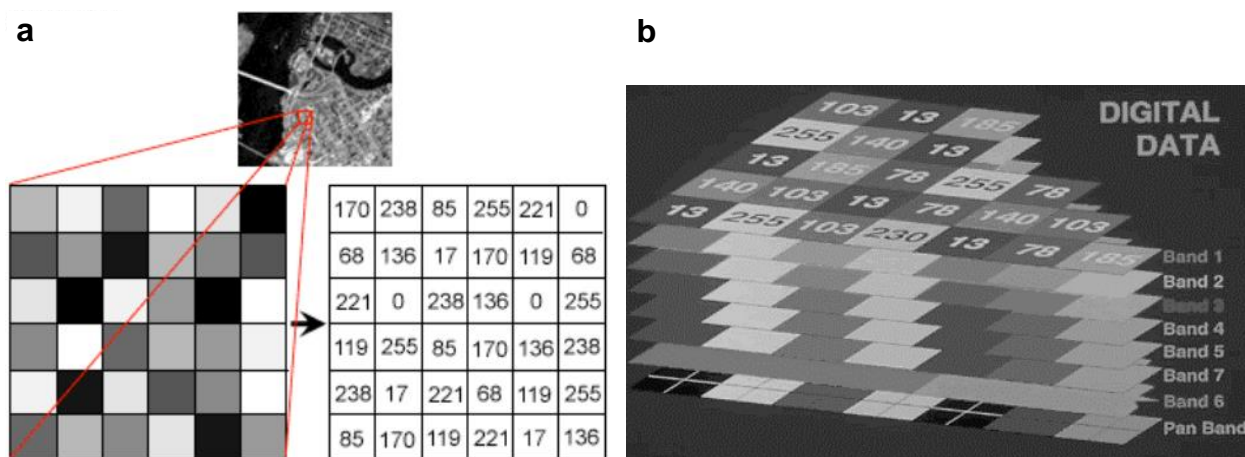


Figura 2.11. Natureza matricial das imagens de satélite: **(a)** representação para uma banda; **(b)** representação para as oito bandas Landsat 7 (NASA, 2006ª).

Sobrepondo diferentes imagens, cada uma correspondente a um diferente intervalo do espectro eletromagnético (ou banda), de acordo com uma determinada ordem, é possível fazer sobressair diferentes características dos objetos a analisar, de forma a distingui-los dos restantes. Combinações de bandas diferentes da que representa as cores naturais (RGB, ou seja, vermelho, verde e azul, por esta ordem), designam-se por “falsa cor” e permitem destacar diferentes objetos (Figura 2.12).

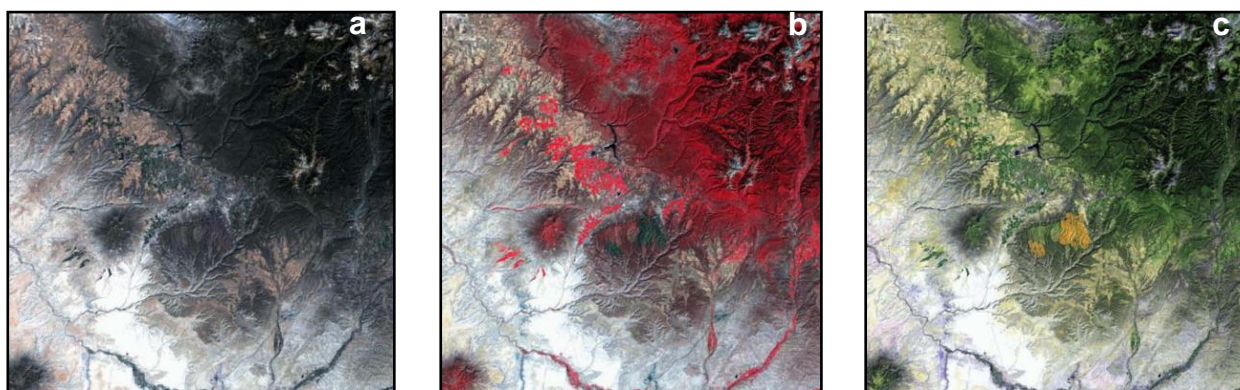


Figura 2.12. Diferentes combinações de bandas ETM+ fazendo realçar diferentes objetos das imagens: **(a)** bandas 321; **(b)** bandas 432; **(c)** bandas 752 (adaptado de NASA, 2006ª).

As imagens são enviadas dos satélites, geralmente através de sistemas de rádio, para as estações em terra, onde são normalmente sujeitas a um tratamento inicial (pré-processamento) para corrigir distorções radiométricas e georreferenciar as imagens, transformando-as de forma a ajustarem-se a uma projeção cartográfica, com base na altitude, na órbita e no movimento do sensor (Mather, 2004). Para maior facilidade no seu envio através da rede, as imagens são normalmente comprimidas em formato “loss/less” (sem perdas), de forma a não adulterar a informação nelas contida. Associada à informação matricial é geralmente anexada informação importante, descritiva, em formato de texto, designada por “metadados”, que contém especificações relacionadas com o equipamento utilizado, o momento de aquisição das imagens, as coordenadas, o número de píxeis e de bandas que as constituem, etc.

2.6 PROGRAMA LANDSAT

Estimulado pelas imagens da Terra vista do espaço, resultantes das missões Apollo à Lua nos anos 60 do século XX, William Pecora, diretor do instituto USGS (*United States Geological Survey*), sugeriu em 1965 a criação de um programa de deteção remota por satélite para aquisição de dados relacionados com os recursos naturais do planeta (Landsat Science, 2014). Embora já existissem satélites meteorológicos a funcionar desde os anos 60, estes não registavam dados da superfície terrestre. O programa Landsat acabou por se tornar o projeto de maior duração na história na aquisição de imagens da superfície terrestre, tendo sido continuamente melhorado ao longo das mais de quatro décadas em que se mantém ativo (Figura 2.13).

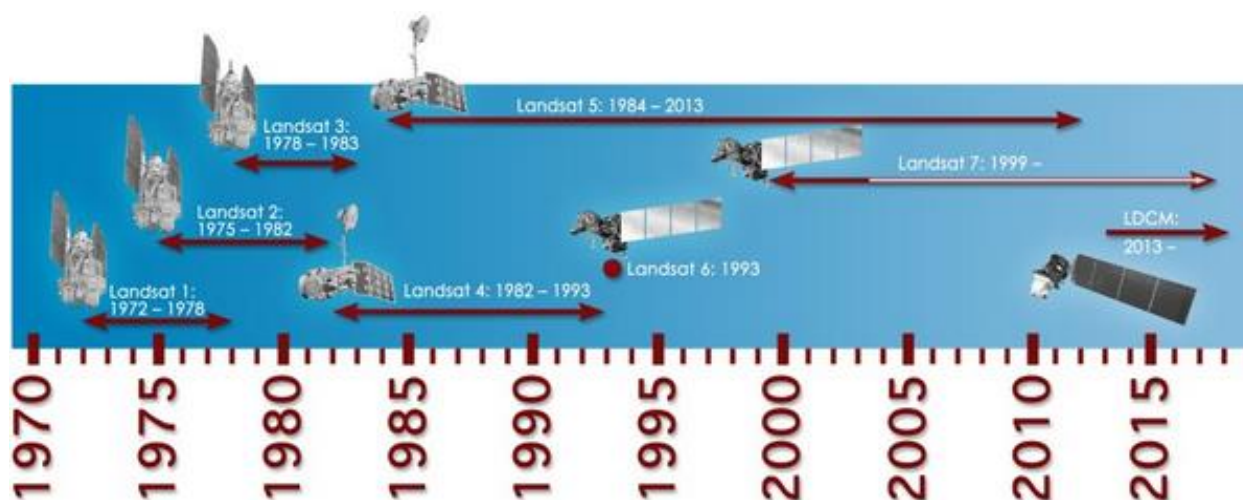


Figura 2.13. Cronologia do Programa Landsat (Landsat Science, 2014).

2.6.1 Landsat 1, 2 e 3

Em julho de 1972 foi construído e lançado pela NASA (US National Aeronautics and Space Administration), numa órbita síncrona solar, a 919 km de altitude (Mather, 2004), o primeiro satélite de observação com o objetivo de estudar e monitorizar a superfície da Terra, designado por *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS), mais tarde renomeado Landsat 1 (**Figura 2.14.a**). Transportava dois sensores, sendo o principal o RBV (*Return Beam Vidicon*), constituído por três câmaras independentes que captavam, a cada 25 segundos, em três gamas do espectro eletromagnético, imagens instantâneas de 185 por 185 km, parcialmente sobrepostas, com cerca de 80 m de resolução (Earth Observation Portal, 2015). O segundo sensor a bordo do Landsat 1, o MSS (*Multispectral Scanner*), era um instrumento eletromecânico que utilizava um espelho oscilatório que direcionava a luz para um conjunto de seis detetores para cada uma das quatro bandas espectrais (Mather, 2004), contendo 24 detetores no total (**Figura 2.14.b**). O espelho realizava varrimentos no sentido perpendicular ao da órbita (*cross-track*), registando imagens com 80 metros de resolução espacial em quatro bandas espectrais: vermelho, verde e duas bandas infravermelhas (Landsat Science, 2015).

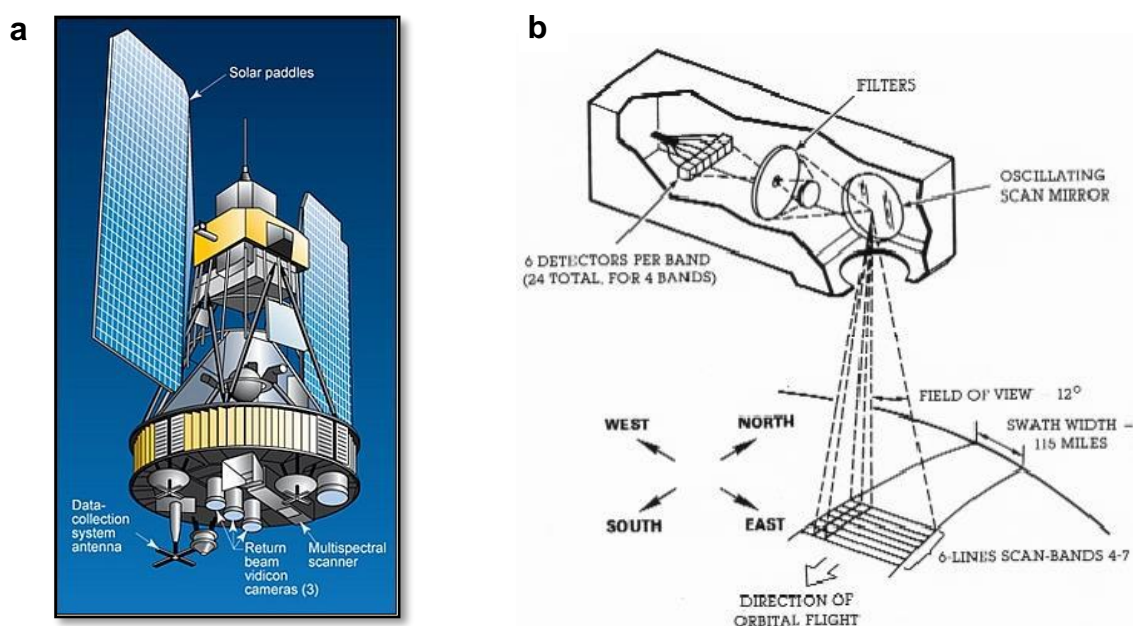


Figura 2.14. (a) Satélite com os sensores Landsat 1 (Earth Observation Portal, 2015); **(b)** Esquema do sistema MSS e respetiva formação da imagem (Earth Observation Portal, 2015).

O Landsat 1 funcionou até 1978, tendo adquirido mais de trezentas mil imagens, representando seis anos de cobertura da superfície terrestre (Landsat Science, 2015). Os satélites seguintes, designados por Landsat 2 e Landsat 3, lançados em 1975 e 1978, respetivamente, seguiram órbitas semelhantes, com altitudes semelhantes, transportando igualmente sensores do tipo MSS (Mather, 2004).

2.6.2 Landsat 4 e 5

Os sensores Landsat 4 e Landsat 5 foram lançados em 1982 e 1984, respetivamente, e colocados em órbitas síncronas solares, quase circulares, a cerca de 705 km de altitude, com inclinação 98,2° e ciclos de passagem de 16 dias (Earth Observation Portal, 2015). Os sensores MSS continuaram a ser utilizados, mas em simultâneo com o novo sensor TM (*Thematic Mapper*), que substituiu o anterior RBV (**Figura 2.15**). O TM utiliza um conjunto de 16 detetores para cada banda ótica (7 bandas), associados a um espelho oscilatório (Mather, 2004). Possui maior resolução espacial do que o MSS (30 metros) e abrange maior gama de valores no espectro eletromagnético (bandas azul, verde, vermelha, infravermelha próxima, duas bandas infravermelhas e uma infravermelha térmica). A banda térmica utiliza quatro detetores e apresenta resolução espacial de 120 metros (Mather, 2004).

O Landsat 5 foi lançado em 1984 e continuou a utilizar os sensores MSS e TM, adquirindo imagens durante quase 30 anos, sendo considerado o satélite de observação terrestre com maior duração de funcionamento (Landsat Science, 2015).

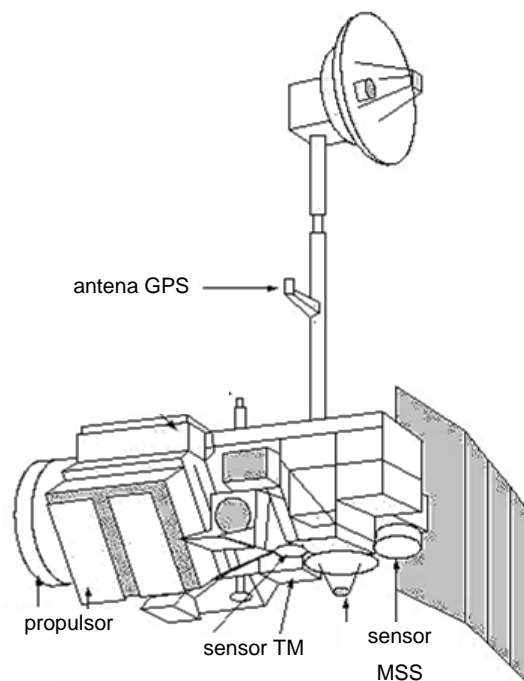


Figura 2.15. Esquema dos satélites Landsat 4 e Landsat 5 (adaptado de Earth Observation Portal, 2015).

2.6.3 Landsat 6 e 7

Em 1993 foi lançado o Landsat 6, com o novo sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper), mas um problema aquando do seu lançamento impediu-o de captar imagens. Este novo sensor estava preparado para registar dados com a mesma resolução espacial do anterior TM, mas incluía uma oitava banda com resolução espacial de 15 metros, designada pancromática, sensível a radiações entre o verde visível e o infravermelho próximo do espectro eletromagnético (Landsat Science, 2015).

O Landsat 7 foi lançado em 1999, mantendo as mesmas características orbitais dos anteriores (**Figura 2.16**). Com o seu lançamento foi introduzido o novo sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), com funções adicionais (uma banda térmica com 60 metros de resolução espacial) e mantendo a banda pancromática do ETM. Incluiu a bordo um gravador de dados e um sistema de calibração radiométrica (com precisão de 5 %), sendo mais rigoroso e melhor calibrado e considerado “o mais estável e melhor caracterizado instrumento de observação da Terra jamais colocado em órbita” (Landsat Science, 2015).

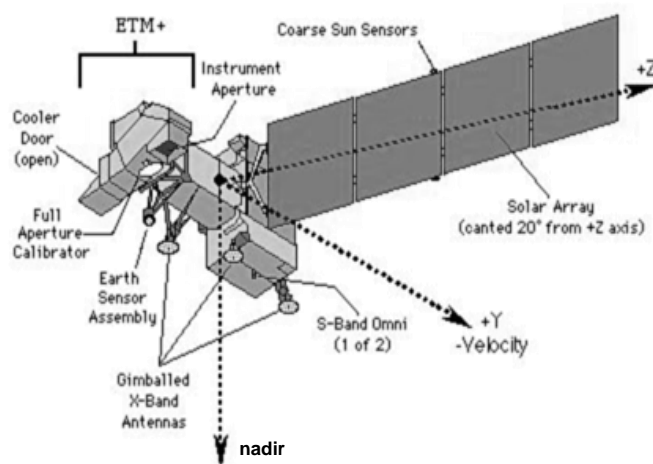


Figura 2.16. Esquema do satélite Landsat 7 (Earth Observation Portal, 2015).

O sensor continua a registar imagens até hoje, mas em maio de 2003 perdeu o sistema de correção SLC (*Scan Line Corrector*), um mecanismo eletro-ótico que fazia a compensação do movimento de avanço do sensor (produzindo um padrão de linhas paralelas, transversais ao movimento, em vez do “zig-zag” resultante da combinação do avanço do sensor com o movimento de varrimento). As imagens passaram a apresentar falhas nas zonas periféricas, não afetando, no entanto, uma faixa central com cerca de 22 km de largura (**Figura 2.17**). As imagens adquiridas a partir daquela data passaram a designar-se SLC-off, tendo as anteriores adquirido a designação SLC-on. A partir de janeiro de 2009 as imagens Landsat passaram a estar disponíveis de forma gratuita.

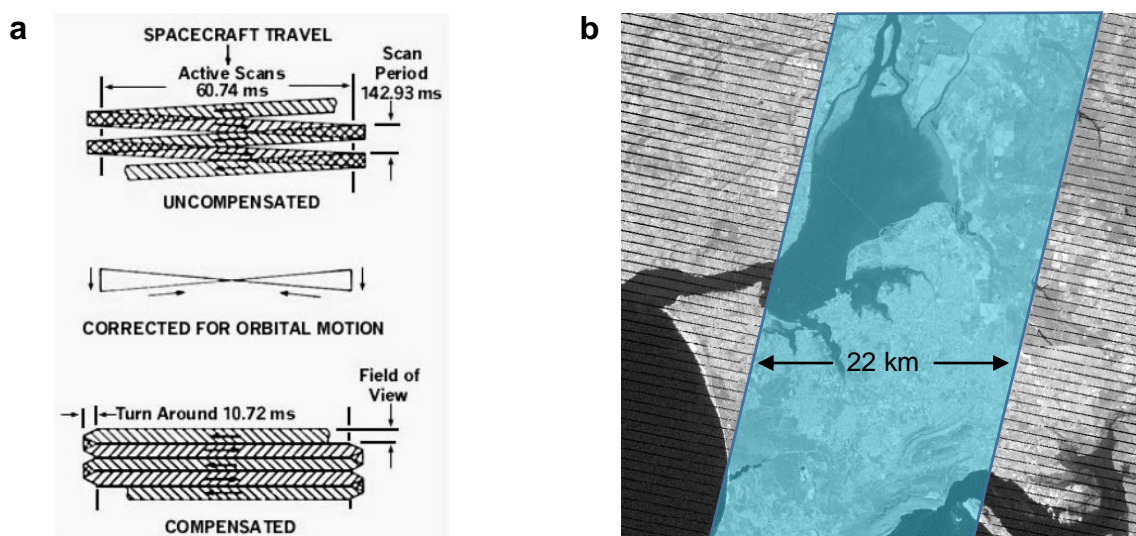


Figura 2.17. (a) Esquema do sistema SLC (NASA, 1999); (b) imagem Landsat 7 SLC-off de 11-3-2014.

2.6.4 Landsat 8

O sensor Landsat 8 (no início designado por LDCM - *Landsat Data Continuity Mission*) foi lançado em 2013 numa colaboração entre a NASA e o USGS, com o objetivo de disponibilizar à comunidade dados para análise de fenómenos evolutivos na superfície terrestre, de forma consistente com os dados anteriores do programa, cobrindo a quase totalidade da superfície numa base sazonal, com resolução espacial, espectral e temporal suficientes para caracterizar as causas e as consequências das mudanças registadas (Earth Observation Portal, 2015). Mantém as características dos anteriores em termos de órbita, fazendo uma translação completa a cada 98,9 minutos (USGS, 2015).

Está equipado com dois novos sensores: o OLI (*Operational Land Imager*) e o TIRS (*Thermal InfraRed Sensor*). O primeiro (**Figura 2.18**) possui um telescópio de 4 espelhos que orientam a radiação para um plano focal, seguidamente captada por cerca de 7000 detetores alinhados para cada banda espectral, exceto para a banda pancromática, com 13000 detetores (Landsat Science, 2015). Ao contrário dos sistemas utilizados anteriormente, que possuíam um espelho móvel que varria toda a largura da imagem para conduzir a luz para os sensores (sistema mecânico), o novo sistema “*push-broom*” regista instantaneamente uma linha de varrimento completa, evitando os problemas gerados pelas peças móveis, tais como movimentos ou interferências (**Figura 2.19**).

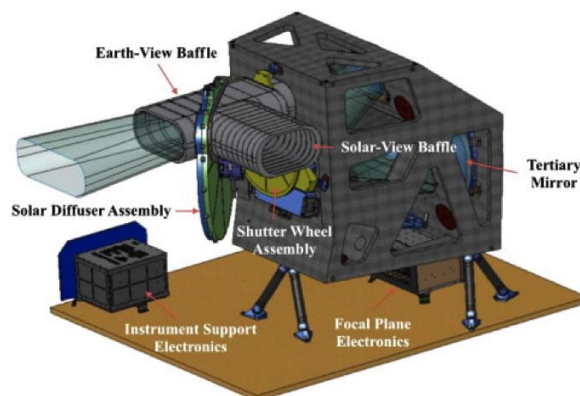


Figura 2.18. Esquema do sensor OLI (Landsat Science, 2015).

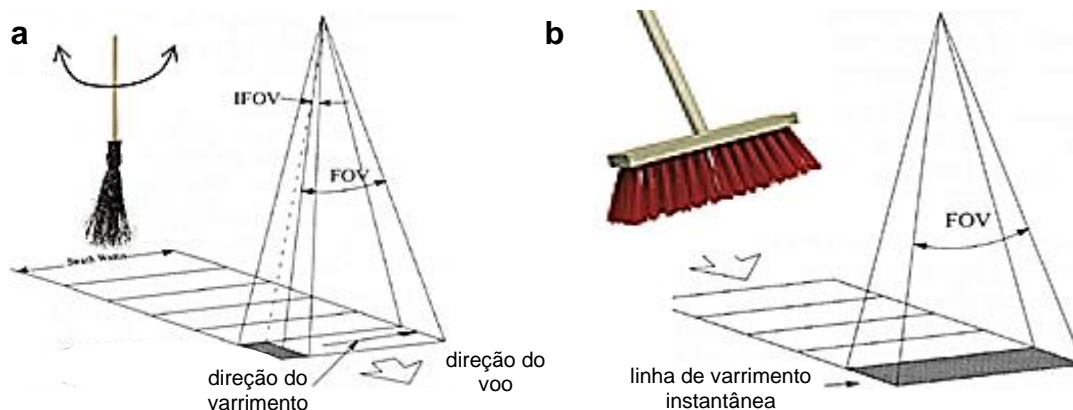
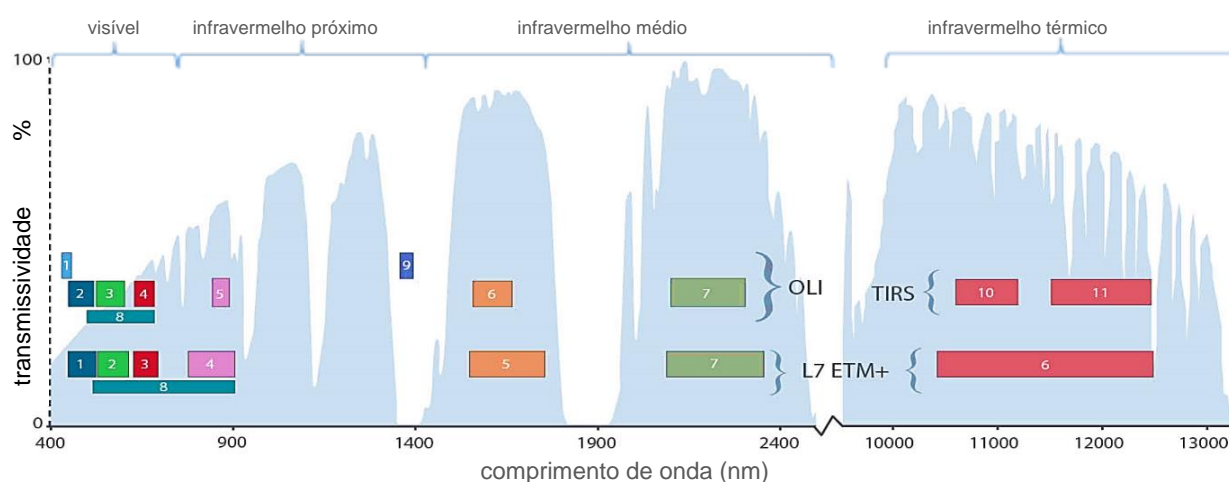


Figura 2.19. Tipos de sensor: (a) mecânico; (b) push-broom (adaptados de Exelis, 2015).

O sensor OLI regista imagens com resolução espacial de 30 metros para as bandas visíveis, infravermelho próximo e infravermelho médio e de 15 metros para a banda pancromática, apresentando duas bandas novas relativamente ao seu antecessor: banda 1 (*coastal*) e banda 9 (*cirrus*), com algumas diferenças nos intervalos de cobertura de seis das antigas bandas ETM+ (**Figura 2.20**). O sensor TIRS apresenta duas bandas térmicas, com 100 metros de resolução espacial (USGS, 2014). Ambos os sensores vêm equipados com maior resolução radiométrica, com quantização de 12 bits em vez de 8, mas apresentando 16 bits nos dados fornecidos (porque cada dado de 12 bits fica armazenado em dois bytes de 8 bits (Landsat Science), ou seja, em vez dos 256 tons de cinzento dos sensores anteriores, o sensor OLI contempla até 55000 tons de cinzento (USGS, 2014)). As imagens apresentam também menor nível de ruído do que as do antecessor ETM+ (USGS, 2014).



Landsat-7 ETM+ Bands (μm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514	30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601	30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692	30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898	30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 - 12.36	100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
			100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896	15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

Figura 2.20. Diferenças espectrais entre as bandas cobertas pelos diferentes sensores dos satélites Landsat 7 e Landsat 8 (adaptado de Landsat Science, 2014).

2.6.5 Órbitas Landsat

No geral todos os satélites do programa Landsat percorrem órbitas polares (que passam sobre os pólos ou próximo deles, apresentando inclinação próxima dos 90° na zona do Equador) e síncronas solares (órbitas geocêntricas com passagem no mesmo local à mesma hora, de acordo com a sua frequência de passagem, apresentando, desta forma, o mesmo ângulo de incidência da luz, para a mesma estação do ano) (**Figura 2.21**). A sua frequência de passagem é de 18 dias para os mais antigos e de 16 dias para os mais recentes (a partir do Landsat 4). As imagens Landsat estão armazenadas no Centro EROS (*Earth Resources Observation and Science*).

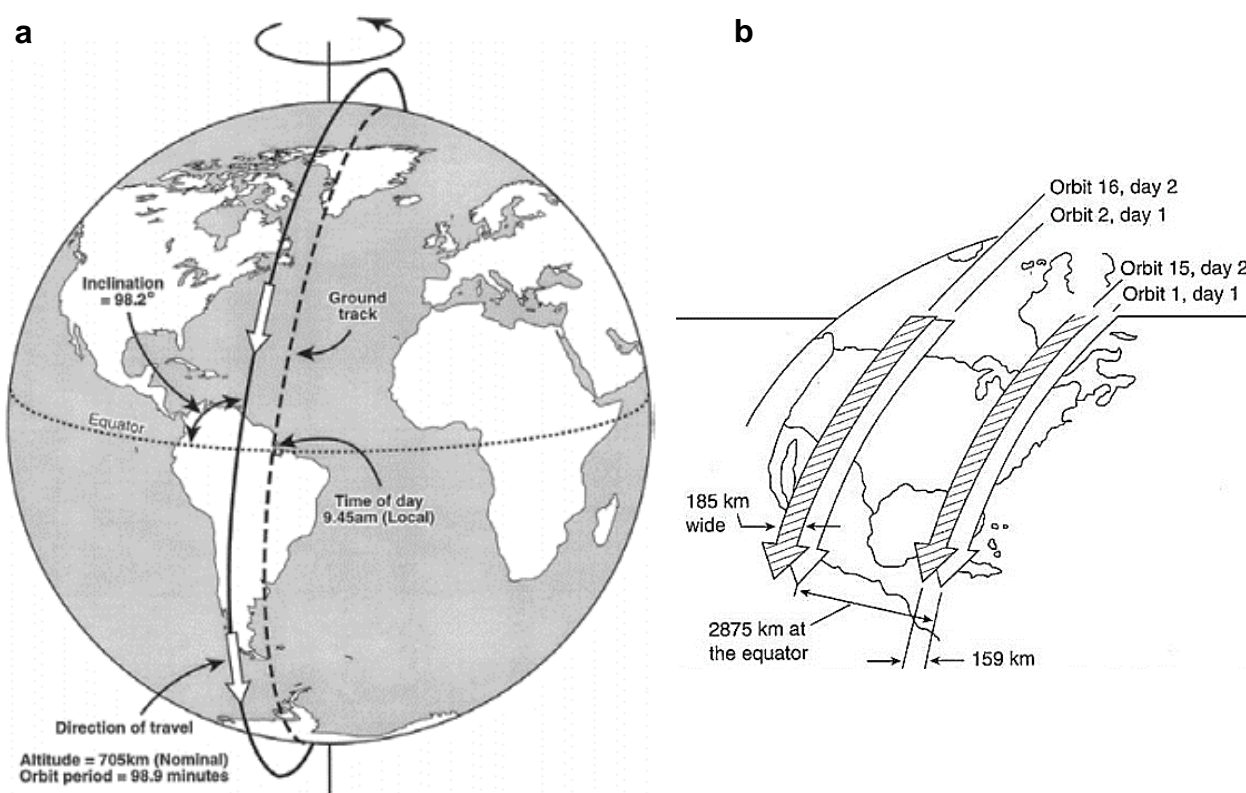


Figura 2.21. Órbita polar do satélite Landsat: **(a)** esquema global (Mather, 2004); **(b)** esquema de passagens consecutivas (What-when-how, 2014).

2.6.6 Imagens Landsat

Os sensores Landsat adquirem dados sob a forma de valores numéricos que correspondem à intensidade de energia refletida numa área de terreno aproximada de 30 por 30 metros (nas bandas multiespectrais TM, ETM+ e OLI) ou de 60 por 60 metros (nas bandas multiespectrais MSS), para cada um dos intervalos do espectro analisados por esse sensor. A

informação é gravada numa matriz independente para cada um dos intervalos espectrais, sendo posteriormente convertida numa imagem digital *raster* com píxeis cujo tom respeita uma escala de cinzentos, em que o valor 0 corresponde ao preto e o 255 ou o 55000 ao branco (255 nas imagens TM e ETM+ e 55000 nas imagens OLI). A imagem Landsat apresenta um formato aparente de paralelogramo, devido à correção feita para compensar o movimento de rotação da Terra relativamente ao satélite durante os poucos segundos necessários para a obtenção da totalidade da imagem (**Figura 2.22**).

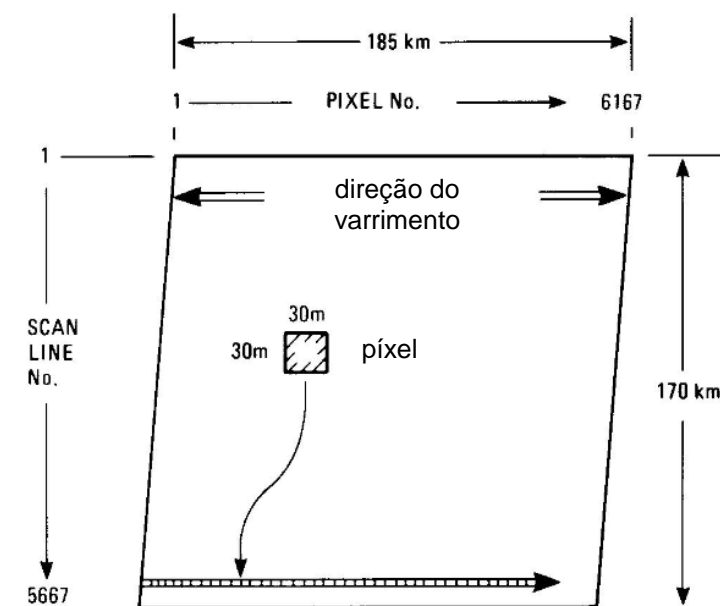


Figura 2.22. Organização das linhas de varrimento e dos píxeis numa imagem TM Landsat (adaptado de Sabins, 2000).

As vantagens da utilização das imagens Landsat relativamente a outras fontes de informação na área da deteção remota são muitas, mas salientam-se: o seu formato digital, que permite a partilha e envio rápidos; as suas grandes dimensões no terreno (cerca de 185 por 170 km), permitindo utilizar apenas uma imagem numa grande área; a antiguidade do programa, que permite recuar até ao final dos anos 70 do século XX; o curto tempo de revisitação (com frequência quase bimensal das imagens); a alta resolução espacial (30 metros para os satélites mais recentes, convertíveis em 15 metros por fusão com a banda pancromática); a resolução espectral (que inclui o visível e os infravermelhos próximo, médio e térmico); a precisão; a gratuidade e disponibilidade na Internet; o seu carácter georreferenciado e ortorretificado; e o formato numérico das imagens raster, que funcionam como matrizes e permitem executar cálculos, incluídos no processamento digital de imagens.

As imagens Landsat estão disponíveis gratuitamente online, para download, em <http://earthexplorer.usgs.gov/>, no *Landsat Archive*, bastando um registo e autenticação para ter acesso aos produtos de Nível 1 (com correção de terreno e de precisão), com as seguintes características (USGS, 2015):

- formato GeoTIFF (*Geographic Tagged Image-File Format*), ou seja, ficheiros de imagem TIFF com informação cartográfica e geodética padronizada associada (metadados);
- método de reamostragem por convolução cúbica (*cubic convolution*);
- resolução espacial de 30 metros (TM, ETM+ e OLI) ou de 60 metros (MSS) por píxel nas bandas multiespectrais;
- projeção cartográfica UTM (*Universal Transverse Mercator*);
- datum WGS (*World Geodetic System*);
- orientação da imagem com o norte para cima.

2.7 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS

O processamento de imagens, incluído no conjunto das técnicas de deteção remota, permite extrair, manipular e quantificar a informação temática contida naquelas, através de fotointerpretação associada a diferentes operações, com o objetivo de realçar determinadas características para posterior análise. Atualmente a maior parte das imagens são disponibilizadas em formato digital, permitindo o seu processamento digital e/ou automático, aumentando assim a qualidade e a quantidade de informação que é possível utilizar.

O processamento digital de imagens pode ser dividido em três fases, de acordo com Fonseca e Fernandes (2004): operações de pré-processamento (em que são eliminadas as possíveis distorções radiométricas ou geométricas existentes, resultantes de vários fatores no momento de aquisição; operações de transformação (em que são realçadas algumas características úteis para o objetivo do estudo); e fase de exploração, em que é extraída da imagem a informação (qualitativa e/ou quantitativa) necessária à análise a efetuar. Esta divisão é, no entanto, subjetiva, estando as várias fases do processo dependentes do tipo de utilização a atribuir aos dados disponíveis.

2.7.1 Pré-processamento

As imagens obtidas por processos de deteção remota podem por vezes necessitar de tratamento prévio, devido à presença de distorções, que podem ser radiométricas, quando correspondem a alterações nos valores de intensidade dos píxeis, ou geométricas, se relacionadas com alterações nas posições absolutas ou relativas desses elementos (Fonseca e Fernandes, 2004).

Os processos de pré-processamento destinam-se a compensar possíveis defeitos cosméticos, distorções geométricas, interferência atmosférica ou variações na iluminação; a calibrar as imagens por possível degradação do sensor; e a corrigir os valores dos píxeis devido aos efeitos da topografia (Mather, 2004). Atualmente a maior parte destas tarefas é realizada pelo produtor dos dados, antes de os disponibilizar ao utilizador, como é o caso das mais recentes imagens do programa Landsat. A sua missão de continuidade implica que todas as imagens disponibilizadas sejam consistentes com imagens anteriores, em termos de geometria, calibração, cobertura e características espectrais, para permitir comparação entre imagens de diferentes datas (NASA, 1999).

O pré-processamento pode incluir as correções radiométricas que visam reduzir erros e/ou distorções resultantes da interação da radiação com a atmosfera (efeitos de absorção e dispersão, já referidos) ou do efeito topográfico (que resulta do declive e da exposição do terreno, que é menor para áreas mais planas). Os próprios sensores podem produzir ruído, alterando os valores dos píxeis da imagem, obrigando a converter o sinal digital (DN) em valores de refletância da superfície, que possam relacionar-se com medições efetuadas no terreno. A presença de linhas de varrimento vazias (de cor preta ou branca, com DN nulo ou máximo), resultantes do movimento de varrimento dos sensores, ou por perda durante o envio das imagens, poderá também ser corrigida nesta fase, através de técnicas de autocorrelação espacial, que estimam os valores dos DN em falta com base nos valores dos píxeis vizinhos (de acordo com a teoria de que os fenómenos naturais exibem autocorrelação espacial, logo pontos geograficamente próximos tendem a apresentar valores próximos na variável de interesse) (Mather, 2004).

As correções geométricas destinam-se a reduzir distorções resultantes do movimento de rotação da Terra, da sua curvatura ou de variações na altitude do sensor e incluem a georreferenciação das imagens. Atualmente, para a maioria dos dados disponíveis, este passo é desnecessário, porque a informação chega ao utilizador com as correções geométricas já efetuadas.

As operações de realce melhoram a capacidade de interpretação visual, seja por alteração do contraste da imagem (melhoramento radiométrico ou modificação do histograma), ou por

conversão dos tons de cinza em cores (por composição de diferentes bandas espectrais). Esta última é útil porque o olho humano tem maior capacidade para distinguir cores do que tons de cinzento. As operações de realce são consideradas operações pontuais, por utilizarem apenas operações no mesmo píxel, não incluindo os píxeis vizinhos (não alterando, desta forma, as relações entre píxeis).

2.7.2 Processamento

O processamento (ou transformação) consiste na extração de informação qualitativa e quantitativa dos dados, de acordo com o fim a que se destinam. Abrange técnicas cujo objetivo é o de realçar determinadas propriedades dos objetos a estudar e que podem ser de natureza espacial ou espectral. No primeiro caso incluem-se as operações de fusão e no segundo as operações algébricas e de classificação.

As técnicas de fusão incluem o *pan-sharpening*, que consiste na utilização de uma banda de maior resolução espacial (a banda pancromática) para aumentar o nível de pormenor de imagens multiespectrais (de menor resolução), através da fusão de ambas, mantendo a maior resolução espacial e a informação multiespectral. Esta é considerada uma operação de vizinhança, por incluir os píxeis vizinhos no processo.

As operações algébricas entre diferentes bandas (adição, subtração, multiplicação, divisão e potência) são operações pontuais, baseadas na análise espectral, com o objetivo de fazer sobressair determinados elementos (vegetação, alguns tipos de solo, minerais de argila, etc.). Uma das técnicas mais frequentemente utilizadas para este fim é a derivação de índices, cujas operações algébricas dependem do objetivo final da análise, sendo o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) o mais conhecido método de derivação de índices, utilizado para realçar e distinguir vegetação.

A classificação de imagens permite transformar a informação em cru, observada nas imagens, em informação temática, com significado para o estudo a que se destinam. Desenvolve-se aqui esta operação em mais pormenor, por ser um passo de grande importância neste trabalho.

Classificação

O processo de classificação permite fragmentar uma imagem em grupos de características espectrais semelhantes, constituindo uma ferramenta importante em estudos de cartografia de

ocupação do solo. Consiste na extração de informação a partir do reconhecimento dos padrões de resposta espectral dos diferentes elementos analisados, podendo ser assistida ou não assistida (ou híbrida, caso seja benéfica a utilização de ambos os processos para tirar partido das vantagens de cada um deles).

A classificação não assistida ocorre quando não há informação suficiente acerca da cobertura da área de estudo e a segmentação é realizada de forma automática pelo algoritmo de classificação, sendo necessário definir apenas o número de classes a obter. Este método, iterativo e objetivo, baseia-se exclusivamente na distribuição estatística dos dados da imagem, através da criação de “clusters” (grupos de dados com características semelhantes), cuja natureza não é conhecida. Estes *clusters* são posteriormente analisados pelo utilizador, que terá de definir as classes a partir deles, com base no conhecimento de campo disponível, ou *ground truth*.

No caso da classificação assistida, o utilizador define previamente cada uma das classes, com base em fotointerpretação e/ou levantamentos de campo (*ground truth*), criando áreas ou polígonos de treino (havendo uma componente de subjetividade, que poderá influenciar o resultado final da classificação). Esta amostragem representa as características espectrais essenciais de cada classe, sendo-lhe atribuído um intervalo de valores espectrais com base nas várias bandas incluídas na classificação (**Figura 2.23**). A cada píxel da imagem resultante o classificador irá atribuir uma classe, baseando-se nas suas características espectrais e na regra de decisão escolhida para o algoritmo (fase de comparação na **Figura 2.23**).

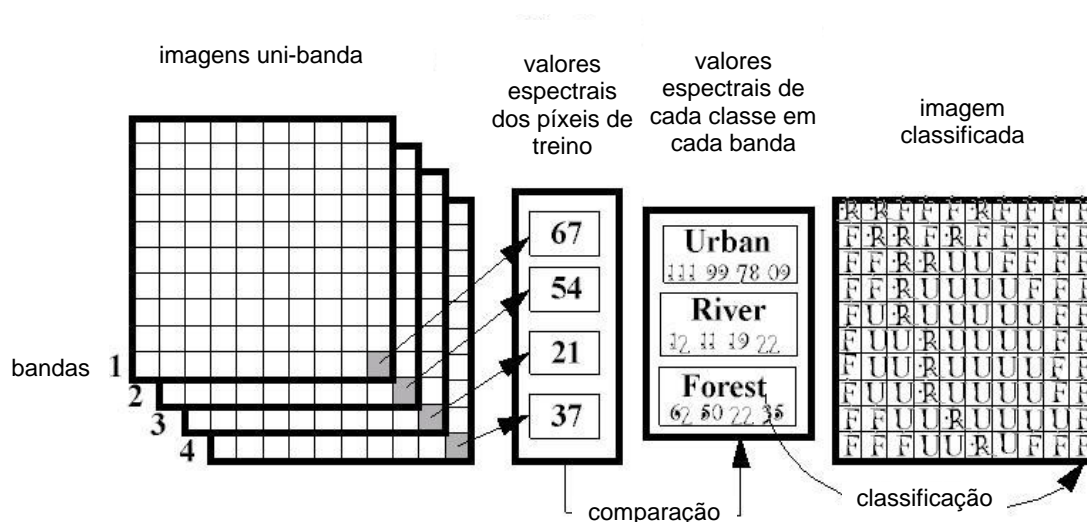


Figura 2.23. Esquema da classificação assistida (adaptado de Chulalongkorn University, 2015).

O algoritmo estatístico mais frequentemente utilizado na classificação assistida é o da máxima verosimilhança, que assume que as características radiométricas de cada classe têm frequência de distribuição aproximadamente normal. A atribuição de determinada classe a cada píxel depende da sua probabilidade de pertencer a essa classe, que, de acordo com o algoritmo, depende da proximidade ao centro e do tamanho e forma da classe (**Figura 2.24**).

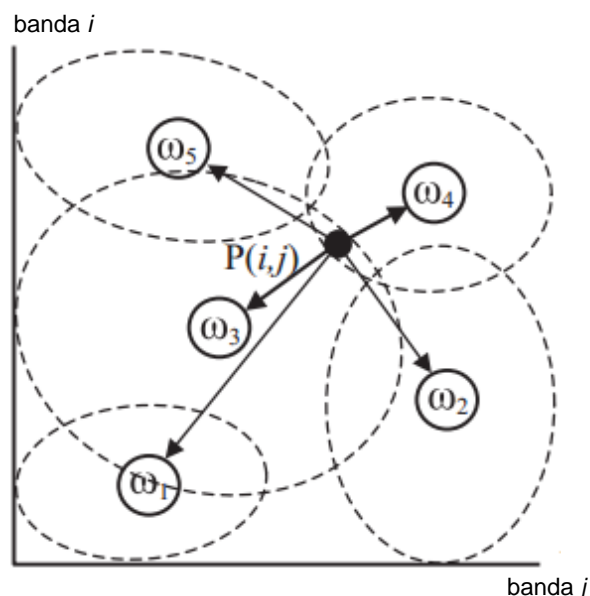


Figura 2.24. Representação das classes radiométricas ($\omega_1 - \omega_5$) com os limites a tracejado e o ponto P a atribuir a uma classe (adaptado de Liu e Mason, 2009).

Pode dar-se o caso de ser benéfica a utilização de ambos os tipos de classificação, iniciada por um método de classificação não assistida, que após interpretação através do conhecimento do *ground truth* pode ser reclassificada com recurso a uma técnica de classificação assistida. Este método híbrido permite distinguir algumas classes durante a fase não assistida, que de outra forma ficariam por detetar.

2.7.3 Pós-processamento

A fase de pós-processamento aplicada a imagens classificadas de deteção remota inclui, para além de melhoramentos nas imagens resultantes para apresentação dos resultados, a avaliação da precisão da classificação e a aplicação de filtros.

Avaliação da precisão da classificação

A qualidade da classificação pode ser avaliada através da determinação do grau de erro dos dados classificados (relativamente ao *ground truth*, ou seja, a um conjunto de dados obtidos por fotointerpretação, levantamento de terreno ou outro meio fiável de determinação dos objetos representados nas imagens). A forma mais frequentemente utilizada para o fazer é através de uma matriz de confusão (**Figura 2.25**), que consiste numa tabela de dupla entrada, cujas colunas

são preenchidas com os dados do produtor (classificados), e cujas linhas são preenchidas com os dados do utilizador (*ground truth*). Numa matriz de confusão, os elementos pertencentes à diagonal principal (ii) são os dados cuja classificação coincide com o *ground truth* (dados corretamente classificados). A matriz de confusão permite determinar a precisão do produtor (percentagem de dados de uma classe corretamente classificados) e a precisão do utilizador (percentagem de dados de uma classe corretamente fotointerpretados).

matriz de confusão	classe 1	classe 2		classe j
classe 1	11	12	-	1j
classe 2	21	22	-	2j
	-	-	-	
classe i	i1	i2		ij

Figura 2.25. Esquema de uma matriz de confusão.

O índice *kappa* é uma outra forma de avaliar a qualidade da classificação, que parte dos resultados da matriz de confusão e é obtido através da **Equação 2.1** (Liu e Mason, 2009), em que N representa o total de píxeis na área de estudo; C_{ii} representa o número de píxeis em cada célula da diagonal (os corretos); e Nr_i e Nc_i representam, respetivamente, o total de píxeis por linha (*row*) e por coluna (*column*) para cada classe.

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^m C_{ii} - \sum_{i=1}^m Nr_i \cdot Nc_i}{N^2 - \sum_{i=1}^m Nr_i \cdot Nc_i} \quad (\text{Equação 2.1}),$$

O índice κ é tanto maior quanto maior for a concordância entre a classificação e a observação, em que o valor 1 representa concordância máxima (Liu e Mason, 2009), sendo considerada “muito boa a excelente” uma classificação com κ superior a 0,75 e fraca uma classificação com κ inferior a 0,4 (Montserud e Leamans, 1992, Cit. por Mather, 2004).

Filtros

O processo de filtragem é frequentemente utilizado na fase de pós-processamento, com o objetivo de melhorar a definição de contornos, remover possíveis ruídos ou excluir píxeis isolados da imagem classificada. A remoção de píxeis isolados (pertencentes a classes diferentes daquela em que se situam) permite, não só melhorar o aspeto da imagem, como também aumentar a precisão da classificação (assumindo que os píxeis isolados estão geralmente associados a erros de classificação). O filtro utilizado para suavizar imagens classificadas (*majority filter*) faz a substituição dos valores de cada *píxel* com base na maioria dos *píxeis* vizinhos contíguos, podendo referir-se apenas aos 4 píxeis com arestas comuns, ou incluir, além

destes, os que o contactam através dos vértices (8 píxeis contíguos), permitindo suavizar os cantos em zonas retangulares (**Figura 2.26**).



Figura 2.26. Aplicação de um filtro do tipo “Majority” com utilização dos 8 píxeis contíguos e limite de substituição com base em metade dos píxeis (ArcGIS Resource Center).

2.7.4 Interpretação e Análise

A fase de interpretação e análise das imagens temáticas (após os ganhos obtidos durante o processamento) pode ser considerada a fase final e o objetivo do processamento digital de imagens (e, conseqüentemente, da deteção remota), entrando-se aqui no campo dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Estes abrangem, não só os dados com componente geográfica aqui descritos, como o *software* e o *hardware* para os tratar e também os recursos humanos e os procedimentos necessários à prossecução do trabalho. Todo o processo de apresentação dos mapas temáticos (como por exemplo a criação do *layout*), a escolha da informação a apresentar, da escala, o nível de pormenor, etc., está incluído no projeto SIG.

2.8 GEOPROCESSAMENTO AUTOMÁTICO

O geoprocessamento consiste no conjunto das diferentes operações de processamento de dados georreferenciados em ambiente SIG, com o objetivo de criar informação a partir de dados existentes, permitindo analisar, converter e gerir esses dados. Recorre geralmente a ferramentas e modelos existentes nas plataformas SIG, podendo também criar ferramentas novas, específicas para a análise a efetuar.

Desenvolvendo-se geralmente numa sequência de diferentes passos, consoante a análise efetuada e a quantidade de dados utilizada, o geoprocessamento pode ser automatizado através de ferramentas específicas que facilitam a reprodução ou repetição dos processos. A ferramenta *Model Builder* do *Esri ArcMap™* permite automatizar muitos dos processos utilizados nas

técnicas de geoprocessamento, agrupando e ordenando as diferentes ferramentas a utilizar, permitindo criar ou personalizar outras, utilizando linguagem *Visual Basic* ou *Python*. A interface gráfica do Model Builder representa os modelos através de diagramas de fluxo, que podem deste modo ser apresentados graficamente e facilmente partilhados, representando uma forma intuitiva de programação de modelos geográficos, que podem também funcionar como auxiliares de memória para futuros trabalhos que voltem a utilizar os mesmos métodos

3. MARGENS ESTUARINAS

A transição entre os meios continental e marinho faz-se através de elementos morfológicos de maior ou menor extensão, resultantes da combinação de diferentes fatores, que influenciam a morfodinâmica a diferentes escalas, temporal e espacial. A geologia, os sedimentos (o seu fornecimento e características) e os forçadores externos (vento, ondas e marés) constituem as condições ambientais determinantes na morfodinâmica costeira, acrescentando-se atualmente o fator humano como um importante elemento neste processo (Masselink et al., 2011). Na **Figura 3.1** esquematiza-se a complexa interação destes fatores, sendo o estado inicial condicionado pela geologia, dependente da tectónica, com a litologia a determinar o tipo e a quantidade de sedimentos disponíveis, também dependentes do transporte sedimentar.

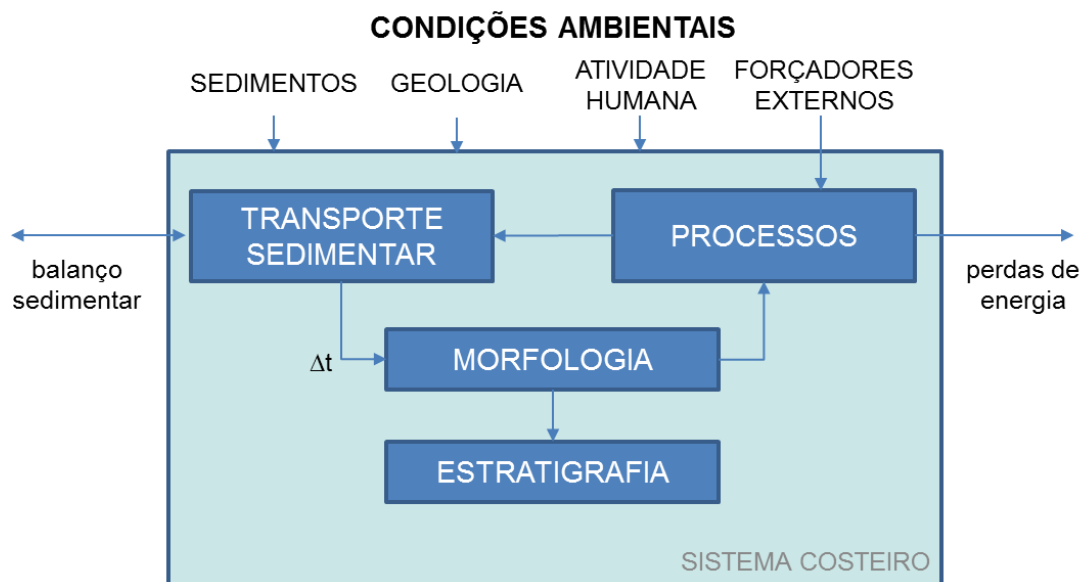


Figura 3.1. Componentes principais da morfodinâmica dos sistemas costeiros (adaptado de Masselink et al., 2011).

Durante o período Quaternário, o nível do mar sofreu flutuações verticais superiores a 135 metros, resultantes da expansão e contração das calotes polares e das variações na temperatura dos oceanos (Masselink et al., 2011), definindo os limites superior e inferior da intervenção dos diferentes agentes modeladores da faixa costeira (as marés, as ondas e o vento). As zonas costeiras, definidas por estes mesmos limites, apresentam grande diversidade de morfologias no litoral, entre elas as praias, os deltas, as arribas, as lagunas e os estuários.

3.1 ESTUÁRIOS

Os estuários representam uma das mais importantes e complexas formas de transição entre os meios continental e marinho e resultam de um regime transgressivo que, elevando o nível de base de um sistema hidrográfico, provoca a inundação da zona terminal do respetivo vale fluvial (Andrade, 1997). A sua evolução faz-se geralmente no sentido do assoreamento, funcionando como zonas deposicionais para os sedimentos provenientes das respetivas bacias hidrográficas, que originam a formação de lezírias, planícies aluviais e sapais, podendo ou não receber sedimentos de origem marinha. O comportamento dos diferentes elementos morfológicos depende principalmente das correntes de maré, sendo também controlada pelas ondas de geração local e pelas correntes fluviais. O clima pode influenciar a hidrodinâmica, os processos sedimentares e a geomorfologia dos estuários, através de variações da precipitação sobre a respetiva bacia hidrográfica, alterando os regimes de alimentação sedimentar (Masselink et al., 2011).

As zonas marginais dos estuários são aquelas cujos elementos morfológicos, interdependentes, apresentam maior dificuldade em atingir o equilíbrio com os respetivos agentes modeladores, o que provoca constantes transformações na procura desse equilíbrio. A procura destas regiões para as diferentes atividades humanas (portuárias, militares, industriais, agrícolas, turísticas, pesqueiras e marisqueiras), aumenta a pressão sobre o sistema, agravando o desequilíbrio. As zonas intertidais dos estuários (ou zonas entremarés, compreendidas entre os limites de máxima preia-mar e de mínima baixa-mar), estão geralmente ocupadas por elementos morfo-sedimentares característicos destes ambientes, distribuídos essencialmente de acordo com a sua altimetria, por estarem dependentes dos diferentes níveis atingidos pelas marés. As trocas de materiais são frequentes entre os diferentes elementos e variam de acordo com as variações hidrodinâmicas verificadas.

3.2 MARGEM

Freire (2003) definiu as margens estuarinas, de forma genérica, como “a interface entre o suporte terrestre e o meio hídrico”, constituindo “as zonas do estuário onde a evolução morfológica é mais evidente, quando há desequilíbrio entre os elementos morfo-sedimentares e os agentes modeladores”, sendo particularmente sensíveis à pressão antrópica.

De acordo com o Artigo 11º da Lei n.º 54/2005 de 15 de Novembro, “entende-se por margem uma faixa de terreno contígua ou sobranceira à linha que limita o leito das águas”, sendo

a sua largura, para efeitos de jurisdição das autoridades marinhas e portuárias, de 50 metros, contados a partir da linha limite do leito, até ao limite da orla. A esta distância poderão ser acrescentadas zonas de praia que ultrapassem o limite referido (**Figura 3.2**). O Artigo 10º da mesma lei define leito como “o terreno coberto pelas águas quando não influenciadas por cheias extraordinárias, inundações ou tempestades”, compreendendo “os mouchões, lodeiros e areais nele formados por deposição aluvial”. O mesmo artigo refere que “o leito das águas do mar, bem como das demais águas sujeitas à influência das marés, é limitado pela linha da máxima preia-mar de águas vivas equinociais (...), definida, para cada local, em função do espriamento das vagas em condições médias de agitação do mar, no primeiro caso, e em condições de cheias médias, no segundo”.

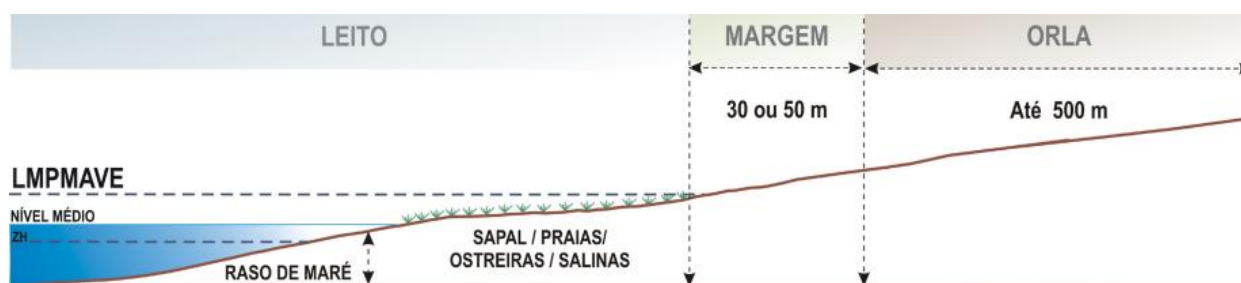


Figura 3.2. Representação esquemática da linha da máxima preia-mar de águas vivas equinociais (LMPMAVE), do leito e da margem, de acordo com a Lei 54/2005 de 15 de novembro e o Decreto-lei 129/2008 de 21 de julho (Rilo et al., 2014).

3.3 RASOS DE MARÉ

As zonas intertidais inferiores (entre os níveis de baixa-mar de águas mortas e de preia-mar de águas mortas (Silva, 2013)) constituem os rasos de maré, caracterizados por declives e relevos muito suaves (entre 0,01 e 0,3 %) e desprovidos de vegetação, podendo no entanto apresentar-se parcialmente cobertos de algas ou de bancos de bivalves. Estão submersos durante a maior parte do ciclo de maré, apresentando emersão quase total apenas durante a baixa-mar de águas vivas (Freire, 2003). O regime de transporte e deposição dos sedimentos é feito essencialmente por suspensão pelas correntes de maré, originando deposição de elementos mais grosseiros nas zonas inferiores e mais finos nas zonas superiores (Silva, 2013). São geralmente constituídos por vasas (em que a fração silto-argilosa é superior a 75 % da amostra total) ou vasas arenosas, cuja fração grosseira (constituída por areia, areão ou

bioclastos) provém, geralmente, de fontes próximas, como praias ou bancos de ostras (Freire, 2003).

Os rasos de maré contactam, inferiormente, com os canais de maré subtidais, onde se verifica um aumento nos níveis energéticos associados às correntes de maré, e, superiormente, com as praias ou os sapais (**Figura 3.3**). A sua evolução depende da presença dos restantes elementos morfo-sedimentares, ocorrendo trocas de materiais entre si.

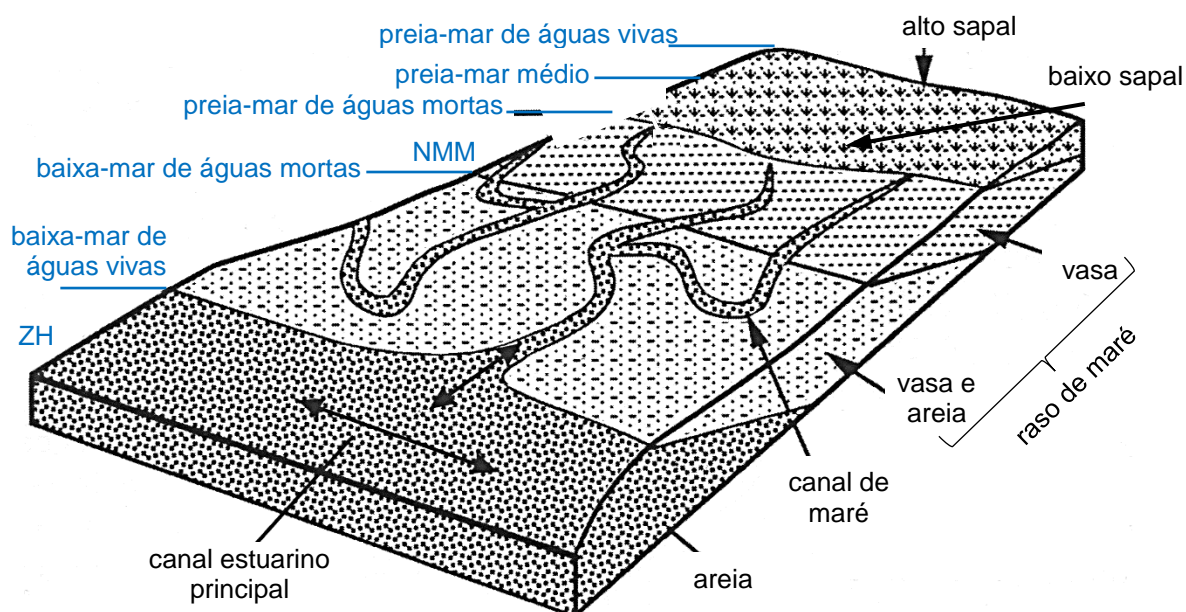


Figura 3.3. Elementos principais constituintes das margens estuarinas e respectivas distribuições sedimentar e altimétrica (adaptado de Masselink et al., 2011).

Os canais de maré encontram-se altimetricamente abaixo dos rasos de maré adjacentes, situando-se frequentemente no domínio subtidal. Fazem o transporte principal de água e sedimentos mais grosseiros através dos rasos de maré, apresentando sub-canais, com ordens e hierarquia semelhante à dos sistemas fluviais terrestres. A velocidade das correntes verificada no interior dos canais (que pode ser superior a 1 m/s, bastante superior à verificada nos rasos e sapais adjacentes, de alguns cm/s), aumenta no final do período de vazante devido ao gradiente hidráulico criado pela maior velocidade de drenagem nos canais relativamente à da superfície dos rasos de maré e dos sapais (Masselink et al., 2011).

A importância hidrodinâmica das zonas de raso de maré prende-se com a capacidade de dissipação da energia das ondas, com a modificação local das correntes de maré e com a retenção de sedimento (Roman e Nordstrom, 1996, Cit. por Freire, 2003, p42).

3.4 SAPAIS

Os sapais situam-se altimetricamente acima dos rasos de maré (podendo estar separados destes por escarpas de erosão ou taludes), entre os níveis de preia-mar de águas mortas e de preia-mar de águas vivas (Silva, 2013), sendo inundados na sua totalidade apenas nesta última situação. Representam os estádios evolutivos terminais dos rasos de maré, após estes atingirem um determinado nível altimétrico, por acumulação de sedimentos silto-argilosos e matéria orgânica em ambiente de baixa energia, o suficiente para permitir a colonização por vegetação tolerante a elevadas concentrações de sal (Freire, 2003).

A sua composição sedimentar é essencialmente vasosa (silto-argilosa), com características coesivas, com frequentes raízes e matéria orgânica e por vezes com areia. A presença de vegetação contribui para o aumento da taxa de sedimentação, reduzindo a possibilidade de ressuspensão dos sedimentos e aumentando o seu teor de matéria orgânica. O crescimento altimétrico do sistema provoca alterações nas condições de emersão e imersão e condiciona as espécies vegetais presentes, ocorrendo diferenciação destas de acordo com a altimetria, dividindo-se o sapal em alto e baixo, consoante a dominância de espécies. O alto sapal, mais maduro e evoluído e com maior densidade de plantas halófitas, apresenta geralmente superfície mais irregular e canais bem definidos, ficando submerso apenas em situação de preia-mar de águas vivas. O baixo sapal, de menores dimensões, apresenta manchas irregulares (podendo reduzir-se aos núcleos de vegetação dispersos no raso de maré), está associado a substrato menos compacto e sofre imersão em todas as estofas de preia-mar (Freire, 2003).

Os sapais constituem elementos de elevado valor ecológico, suportando a cadeia alimentar aquática através da exportação de nutrientes para as águas próximas, das quais retiram e armazenam poluentes, funcionando também como área de nidificação de muitas espécies de aves residentes e migratórias. Protegem as estruturas morfológicas a montante, dissipando a energia das correntes de maré e das ondas em momentos de preia-mar, sendo muito sensíveis às variações do NMM. São os elementos estuarinos mais afetados pela ação antrópica, estando frequentemente associados a infraestruturas industriais, e albergando muitas vezes zonas de produção de sal, de agricultura e de aquacultura. A construção de estruturas artificiais nas zonas

superiores aos sapais impede a sua migração como adaptação à subida do NMM, provocando a sua redução e mesmo desaparecimento.

3.5 PRAIAS ESTUARINAS

Praias estuarinas são depósitos de sedimentos não consolidados, constituídos geralmente por areia, cascalho e bioclastos, trabalhados por ondas e correntes e encontradas ao longo de margens cujas ondas possuem energia suficiente para erodir os materiais das formações costeiras vizinhas (Roman e Nordstron, Cit. por Freire, 2003, p42). A sua formação e evolução dependem da exposição à ondulação, da morfologia dos fundos, da amplitude da maré (que condiciona a largura da praia) e das fontes de material (Jackson e Nordtrom, 1992, Cit. por Freire, 2003, p49). A sua orientação está diretamente relacionada com a direção dos ventos dominantes e das maiores distâncias de *fetch* (distância em água aberta, sem obstáculos, necessária para a formação de ondas).

A sua importância prende-se com a dissipação da energia das correntes e das ondas, oferecendo proteção contra a erosão aos terrenos interiores, e com a sua variedade de flora e fauna (Freire, 2003).

4. ENQUADRAMENTO

4.1 GEOGRAFIA

O Estuário do Tejo situa-se na costa ocidental portuguesa, aproximadamente entre os meridianos 9°30'W e 8°90'W e os paralelos 38°59'N e 38°95'N (*WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere*), apresentando duas direções principais: NNE-SSW na zona montante, extensa e pouco profunda, e ENE-WSW na zona jusante, estreita e profunda devido às dragagens e fortes correntes a que é sujeita (**Figura 4.1.a e b**). É um dos maiores estuários da Europa, ocupando uma área que varia entre 300 km² (em baixa mar) e 340 km² (em preia-mar), representando o troço final do rio Tejo, que nasce na Serra de Albarracín, em Espanha, a 1593 m de altitude e percorre 1070 km até à foz, no Oceano Atlântico. O limite montante da intrusão salina em condições hidrológicas normais situa-se em Vila Franca de Xira, a cerca de 50 km da embocadura e o limite montante da maré dinâmica no estuário situa-se em Muge, a cerca de 80 km da embocadura. O limite jusante do estuário está localizado no Canal do Tejo, entre Lisboa e Trafaria. O caudal médio anual do rio é de cerca de 400 m³s⁻¹, variando entre 100 e 2000 m³s⁻¹, e a bacia hidrográfica correspondente cobre cerca de 80630 km² (Almeida, 2009; Silva, 2013; Freire, 2003; Caçador e Duarte, 2012).

As suas margens apresentam forte assimetria, tanto em termos de uso/ ocupação do solo (**Figura 1.3**), como em termos de morfologia, com a margem norte quase totalmente antropizada e de traçado mais regular (ocupada pelas infraestruturas portuárias, industriais, recreativas e urbanas da capital, Lisboa), e a margem sul, de traçado fortemente irregular e recortado, com algumas zonas agrícolas e naturais (praias, restingas, enseadas, sapais e rasos de maré) e albergando a maior parte da Reserva Natural do Estuário do Tejo.

A Baía do Seixal, situada na margem esquerda do estuário, no concelho do Seixal, ocupa cerca de 4.82 km² e encontra-se abrigada do estuário interior pela restinga do Alfeite (**Figura 4.1.c**), sendo a sua ligação àquele efetuada através de um canal com menos de 150 metros de largura, entre a Ponta dos Corvos e o cais fluvial do Seixal (**Figura 4.2**). É alimentada a montante por uma complexa rede de drenagem, constituída por valas e ribeiros de carácter essencialmente sazonal, proveniente de áreas bastante artificializadas e cortada transversalmente por vias importantes, abrangendo os concelhos de Almada, Seixal e Sesimbra e incluindo algumas estações de tratamento de águas residuais (uma delas, a da Quinta da Bomba, construída em 1994, desagua diretamente na Baía do Seixal (SMAS Almada, 2014)). As três bacias hidrográficas que alimentam estas linhas de água abrangem um total de 72 km², sendo 26 km² correspondentes ao rio Judeu (a sul), 25 km² correspondentes à Vala da Charneca

(a oeste) e 21 km² correspondentes à Vala de Santa Marta (a sudoeste), drenando litologias de idades miocénicas a atuais (Silva, 2013).

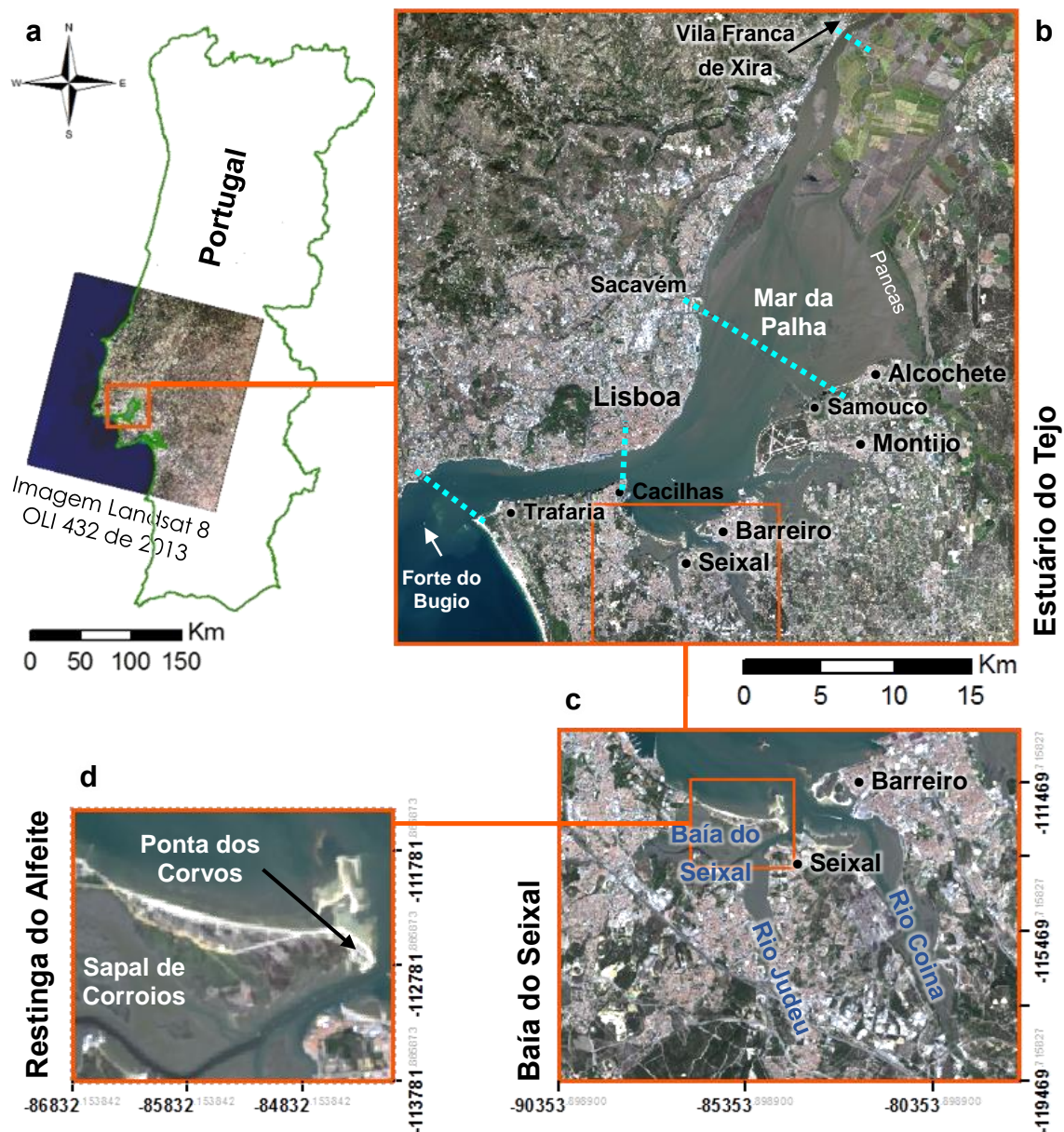


Figura 4.1. Localização da área de estudo: (a) em Portugal Continental (imagem Landsat completa); (b) Estuário do Tejo (com localização das divisões entre troços); (c) Baía do Seixal e rios Coia e Judeu; (d) Restinga do Alfeite e Sapal de Corroios (composição das bandas 4,3,2 de imagem Landsat 8, em ArcMap 10.1TM).

A Restinga do Alfeite, com coordenadas aproximadas 38°39'14, 9°7'35 W na sua raiz (WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere), tem cerca de 2400 m de comprimento em linha reta desde o ponto mais estreito junto à raiz até à Ponta dos Corvos (Figura 4.1.d) e cerca de 820 m de

largura máxima, perpendicularmente ao comprimento medido, desde a praia, a norte, até ao limite sul da caldeira artificial do moinho de maré do Capitão (**Figura 4.6 e Figura 4.7.b**).

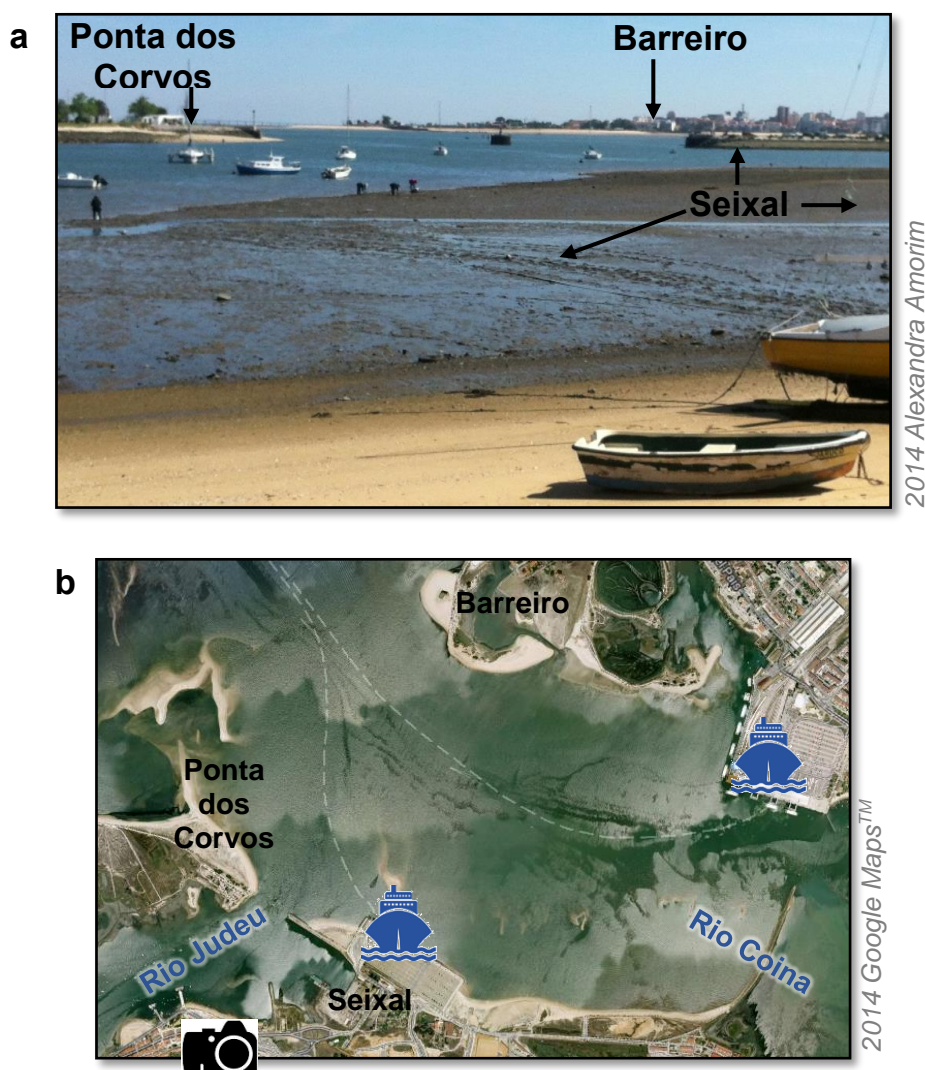


Figura 4.2. (a) Vista para o canal do Rio Judeu, a partir da praia do Seixal, de SSW para NNE; (b) Localização e orientação da foto com indicação dos cais fluviais do Barreiro e do Seixal.

4.2 GEOMORFOLOGIA E BIOLOGIA

O Estuário do Tejo apresenta cerca de 43 % da sua superfície ocupada pelo domínio intertidal, constituído essencialmente por rasos de maré, sapais, ostras e praias, estando também ocupado por elementos de origem antrópica (**Figura 1.4**).

Pode dividir-se em quatro troços (**Figura 4.1.b**), de acordo com as características morfológicas dos vários elementos que os compõem, verificando-se, na zona montante do

estuário, uma zona fluvio-marítima (Freire, 2003), não incluída neste estudo, influenciada pela descarga fluvial e pelas marés dinâmicas, mas sem influência salina, situada entre Muge e Vila Franca de Xira e abrangendo os últimos 30 km do rio antes de entrar na zona do estuário interior. Esta pode dividir-se em dois setores principais, com o primeiro (o superior) a estender-se entre Vila Franca de Xira e Sacavém e a incluir os mouchões, apresentando largura média de 14,5 km e profundidade média de 5 metros, onde se desenvolvem rasos de maré e sapais de grande extensão (Silva, 2013). O setor seguinte, também incluído no estuário interior, designado por setor médio, estende-se até Cacilhas e inclui as enseadas recortadas da margem sul do estuário e a extensa bacia de baixa profundidade designada por Mar da Palha. A jusante o rio afunila no estreito e retilíneo canal de embocadura, ou gargalo do Tejo, com cerca de 7,5 km de comprimento, largura média de 7,5 km e profundidade até cerca de 40 m (Silva, 2013), instalado numa zona de falha, que condiciona o seu trajeto na entrada no Oceano Atlântico. Após o gargalo do Tejo pode considerar-se uma quinta zona, designada por embocadura exterior, desde a linha transversal no final do canal até ao limite da pluma turbida constituída pelos sedimentos em suspensão provenientes do estuário interior (Freire, 2003). Inclui-se nesta zona o delta de vazante e o banco de areia do Bugio (**Figura 4.1.b**).

A margem direita do estuário encontra-se profundamente artificializada, sendo rara a presença de elementos morfo-sedimentares naturais, à exceção da estreita zona de sapal e raso de maré associada à embocadura do rio Trancão, em Sacavém. A margem esquerda do estuário apresenta-se dividida em dois setores, sendo o setor montante, a norte, constituído por vastas áreas de rasos de maré e sapais, incluindo algumas manchas de bancos de ostras (**Figura 1.4**). A jusante deste setor (a partir das salinas do Samouco) a margem sul é constituída por três importantes baías (Montijo, Barreiro e Seixal), formadas nas zonas terminais de linhas de água afluentes ao estuário, com elevadas taxas de sedimentação vasosa (que obrigam a dragagens frequentes). A zona entre Alcochete e Cacilhas, na margem sul, caracteriza-se pela presença de praias e restingas de areia, limitadas por extensos rasos de maré areno-vasosos (Freire, 2003).

4.2.1 Rasos de maré

Os rasos de maré no Estuário do Tejo situam-se entre o nível de baixa-mar de águas vivas e o NMM, sujeitando-se a submersão total em todos os ciclos de maré, raramente emergindo na sua totalidade. Situam-se entre os 0,5 e os 2,3 m ZH em Alcochete (onde atingem larguras de cerca de 6 km) e entre os 0,6 e os 2,2 m ZH na Restinga do Alfeite (Freire, 2003), sendo limitados superiormente por praias de areia, sapais ou construções artificiais (**Figura 1.4**). De acordo com Moreira (1987, Cit. por Freire, 2003), encontram-se parcialmente cobertos por colónias de algas

verdes microscópicas e conchas de ostras e amêijoas, onde se fixam algas castanhas e verdes, apresentando, nas periferias exteriores, antigos bancos de ostras, que alimentam as zonas intertidais com bioclastos resultantes da sua erosão. São constituídos essencialmente por vasas (com fração silto-argilosa superior a 75 %), incluindo por vezes uma componente grosseira (até cerca de 70 %), constituída por areia, areão e muitos bioclastos, provenientes das praias adjacentes e da erosão dos antigos bancos de ostras (Freire, 2003), que povoaram a margem sul, entre Alcochete e Seixal, até ao início da década de 70 do século passado.

As áreas intertidais do estuário apresentam taxas de sedimentação média de cerca de 3 mm/ano, com taxas de erosão nos canais principais de cerca de 1 mm/ano, sendo esta erosão parcialmente devida às dragagens frequentemente realizadas em vários destes canais (Freire et al., 2013).

4.2.2 Praias estuarinas

As praias estuarinas distribuem-se essencialmente entre Alcochete e Cacilhas, com maior representatividade entre Samouco e o canal do Montijo (**Figura 1.4** e **Figura 4.1.b**), estando muitas delas modificadas por aterros ou edificações. A sua orientação corresponde preferencialmente à direção exposta aos ventos dominantes de norte e à maior extensão de *fetch* no estuário, sendo praias mesotidais, caracterizadas por faces de praia inclinadas, com cerca de 6 a 7 ° (Freire, 2003). Articulam-se inferiormente com rasos de maré extensos e sub-horizontais, constituídos por fração silto-argilosa importante e cuja proporção de areia depende das trocas sedimentares transversais com a face de praia, sendo o contacto entre estes dois domínios geralmente rico em cascalho, de importante componente bioclástica (Freire, 2003). A mesma autora descreve vários troços considerados no seu trabalho:

- Alcochete-Samouco, que apresenta uma praia limitada inferiormente por um raso de maré vasoso e superiormente por sapal (Sapal das Hortas, na zona montante) ou por ocupação antrópica (urbana, salinas, etc., na zona jusante);
- Samouco-Canal do Montijo, com 6 km de extensão de areia com frequentes bioclastos, com evidências de deriva litoral residual de sul para norte e limitada inferiormente por um raso de maré areno-vasoso;
- Enseada do Montijo, que apresenta duas praias principais, Seixalinho e Rosário, a primeira contactando superiormente com sapais modificados e a segunda contactando inferiormente com um raso de maré vasoso;

- Barreiro, que apresenta duas restingas parcialmente artificializadas, abrigando manchas de sapal na sua vertente interior, com praias ricas em bioclastos na transição para o raso de maré (resultante do desmonte de bancos de ostras locais);
- Rio Coina, com praias de areia ricas em bioclastos (Santo André e Azinheira), limitadas por rasos de maré areno-vasosos e muitas intervenções antrópicas que alteram o fornecimento sedimentar;
- Baía do Seixal, com pequenas praias, algumas resultantes da erosão pluvial de areeiros outrora escavados em formações pliocénicas (Arrentela e Talaminho) e outras formadas por aterros (Amora e margem sul da Ponta dos Corvos);
- Restinga do Alfeite, com uma praia de cerca de 2500 metros de comprimento e cerca de 25 a 30 metros de largura, rica em bioclastos (provenientes dos bancos de ostras do raso de maré) e apresentando um depósito de cascalho e seixos no limite entre a face de praia e o raso de maré (descrita pormenorizadamente a seguir).

4.2.3 Sapais

Os sapais do Estuário do Tejo estão distribuídos aproximadamente entre os níveis de preia-mar de águas mortas e preia-mar de águas vivas, situando-se estes níveis altimetricamente entre os 1,03 e os 1,86 m (NMM), referentes ao marégrafo do Seixal, e entre os 1,12 e os 2,01 m (NMM), referentes ao marégrafo da Ponta da Erva, na zona dos mouchões (Silva, 2003). A distribuição das manchas de sapal no estuário é condicionada por fatores morfológicos (a altimetria e as condições de abrigo), hidrodinâmicos (as correntes, as ondas de geração local e a disponibilização de sedimentos em suspensão), sedimentares (as características do substrato) e antrópicos (pela limitação da expansão), originando-se maiores manchas em zonas onde a dissipação da energia das ondas é superior, ou seja, a montante dos rasos de maré e em zonas abrigadas das ondas (Freire, 2003). As maiores manchas de sapal encontram-se essencialmente a montante de Alcochete e nas margens dos mouchões, estando as restantes distribuídas em vários pontos ao longo da enseada do Montijo e na Baía do Seixal (**Figura 1.4**), ocupando uma superfície total de 16 km² (Silva et al., 2013). Contactam geralmente, no sentido jusante, com rasos de maré, podendo contactar por vezes com praias; para montante contactam, na maioria das vezes, com estruturas artificiais. Os próprios sapais estão, muitas vezes, intervencionados e ocupados por aterros, construções, caldeiras de moinhos de maré, salinas ou agricultura, sendo que, nestes três últimos casos, há manutenção de algumas das características iniciais do sapal. A transição entre os sapais e os rasos de maré na zona montante do estuário é geralmente mais abrupta (por vezes através de escarpas) do que a mesma transição na zona jusante (Silva et al., 2013).

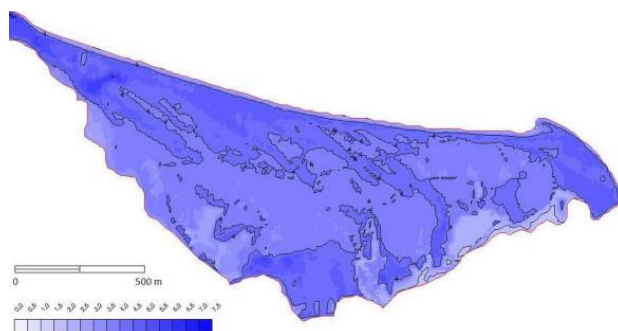
Os sedimentos presentes nos sapais são semelhantes aos dos rasos de maré, apresentando características coesivas (por terem fração argilosa superior a 10 %) e diâmetros médios na classe dos siltes médios (entre 8 e 10 μm). Consideram-se vasas, por incluírem menos de 3 % de fração grosseira (superior a 63 μm) e apresentam frequentemente raízes vegetais e matéria orgânica (Freire, 2003).

A distribuição da vegetação presente nos sapais depende da salinidade e do grau de encharcamento do substrato, havendo predominância de espécies dulçaquícolas na zona montante (Vila Franca de Xira), apesar de alguma salinidade verificada nesta zona, passando a fraca diversidade de espécies halófitas, tolerantes a baixos teores de sal, em direção ao Sapal de Pancas, evoluindo para espécies mais diversificadas e mais tolerantes ao sal entre Alcochete e a Baía do Seixal (Freire, 2003).

Silva (2013) calculou as taxas de crescimento vertical de alguns dos sapais do Estuário do Tejo, obtendo valores entre 0,6 cm/ano (sapal de Corroios) e 2,2 cm/ano (sapal de Pancas), sendo as taxas de acreção dos sapais a montante superiores às dos sapais a jusante, possivelmente por ser na zona montante que se situam as maiores extensões de rasos de maré, principal fonte de alimentação sedimentar dos sapais (Silva et al., 2013).

4.2.4 Restinga do Alfeite e Sapal de Corroios

A Restinga do Alfeite é constituída por uma praia, a norte, que contacta inferiormente com um raso de maré areno-vasoso e superiormente com um estreito sistema dunar. O conjunto apresenta cota máxima de 6 m acima do NMM (Guerreiro, 2013^b), abriga da agitação local uma vasta área de baixa energia hidrodinâmica, a sul, onde se observam grandes manchas de sapal (o Sapal de Corroios) e de raso de maré vasoso (**Figura 4.1.d**).



O corpo da restinga apresenta uma série de cristas arenosas encurvadas, de direção NW-SE (**Figura 4.3**), que podem representar diferentes episódios de crescimento para leste, separadas entre si por cavas preenchidas por vasas e por vegetação halófito e terrestre (Freire, 2003) (**Anexo2.a e b**).

Figura 4.3. Modelo Digital de Terreno da restinga (Guerreiro, 2013^b).

A praia arenosa, com cerca de 2500 metros de comprimento, é ligeiramente arqueada e apresenta largura constante aproximada de 25 a 30 m, ao longo de toda a margem norte e

nordeste da restinga. Contacta superiormente, por vezes através de uma pequena arribas de erosão (**Anexo2.c e d**), com uma duna de largura variável, inferior a 250 m de largura, colonizada essencialmente por pinheiros-mansos e algumas mimosas, vegetação herbácea dunar (**Anexo2.b**) e uma grande cobertura de chorão (CMS, 1997).

A face de praia, com inclinação entre 5 e 10 °, situa-se entre os 2,2 e os 4,3 m ZH, apresentando geralmente perfil transversal refletivo, com uma estreita berma no topo (de granulometria mais fina e melhor selecionada), apenas ativa em situação de preia-mar de águas vivas e inexistente em situações extremas do nível da maré (Freire, 2003). Os sedimentos da face de praia variam entre areias médias e areão, sendo constituídas essencialmente por quartzo e bioclastos, com diminuição das dimensões do grão em direção às extremidades da praia e apresentando bandas longitudinais de sedimentos mais grosseiros, essencialmente bioclásticos (**Anexo2.k**), que marcam os níveis mais elevados da maré (Freire, 2003).

A praia prolonga-se inferiormente para norte por um raso de maré areno-vasoso de inclinação inferior a 0,5 ° (**Anexo2.f e g**), com largura superior a 300 metros, até ao nível de 0,6 m ZH (nível médio de baixa-mar de águas vivas), apresentando marcas de corrente transversais à praia (**Anexo2.e**) e estando coberto por algas e alguns vestígios de antigos bancos de ostras (Freire, 2003) (**Anexo2.f**). A separar a face de praia do raso de maré encontram-se depósitos de cascalho e seixos mal selecionados (**Anexo2.e**), que também aparecem com frequência nas cavas das marcas de corrente. Os sedimentos dominantes no raso diminuem o seu diâmetro médio em direção ao raso exterior (Freire, 2003).

No extremo leste da restinga (a Ponta dos Corvos) enraíza-se um conjunto de bancos arenosos, sobrepostos ao raso de maré (**Anexo2**), que poderão fazer parte do delta de vazante da embocadura da Baía do Seixal, mas que serão parcialmente alimentados através da deriva longilitoral ao longo da praia do Alfeite (Freire, 2003). Estes bancos podem atingir até 2,6 metros acima do NMM (medidos no levantamento DGPS realizado em 19/3/2014) e apresentam algumas zonas totalmente cobertas de conchas (**Anexo2.h e i**), associadas a manchas de cobertura vegetal terrestre (**Anexo2.j**), aparentemente supratidais. A pequena praia situada na margem sul da Ponta dos Corvos (Error! Reference source not found..**m**) terá origem artificial, por deposição de materiais provenientes de dragagens (Freire, 2003).

O corpo da restinga abriga da ondulação gerada no estuário, na vertente sul, a Baía do Seixal, que inclui rasos de maré recortados por uma rede hierarquizada de canais pouco profundos e o Sapal de Corroios, com cerca de 1,43 km² de extensão (Freire, 2003). Os sedimentos de fundo nesta zona são essencialmente vasas, à exceção dos canais (**Figura 4.4**), que apresentam grande quantidade de areias, de composição quártzica (Freire, 2003).

A transição entre as manchas de sapal e os rasos de maré faz-se geralmente através de escarpas com 0,5 a 1 m de desnível. A predominância de áreas de alto sapal, os canais de maré bastante encaixados e a presença de *salt-pans* (charcas) indicam que se trata de um sapal maduro (Silva, 2013). As manchas de sapal no interior da Baía do Seixal apresentam alterações das suas características naturais em cerca de 46 % da superfície total, essencialmente devidas a ocupação agrícola, diques e desvio de canais afluentes, verificando-se em alguns dos casos alguma recuperação das características iniciais, após abandono das atividades (Freire, 2003).

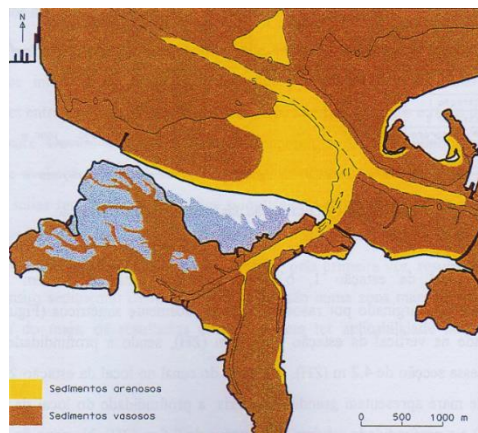


Figura 4.4. Distribuição dos sedimentos na Baía do Seixal (Freire, 2003).

As espécies vegetais mais abundantes no Sapal de Corroios eram, em 2003 (Caçador et al., 2007), a *Halimione portulacoides*, típica de zonas de transição entre alto e baixo sapal e a *Sarcocornia fruticosa*, típica de alto sapal (**Figura 4.5**), sem regularidade nas suas distribuições, com alternância entre espécies no mesmo perfil. Ao longo do tempo tem ocorrido substituição de umas espécies por outras, tendo sido observado, entre 1951 e 2003, forte incremento na proporção da espécie *Halimione portulacoides* relativamente às espécies *Sarcocornia fruticosa* e *Spartina maritima*, tendo esta última desaparecido quase por completo. No geral, diminuiu a diversidade de espécies halófitas e correspondente biomassa (Caçador e Duarte, 2012).

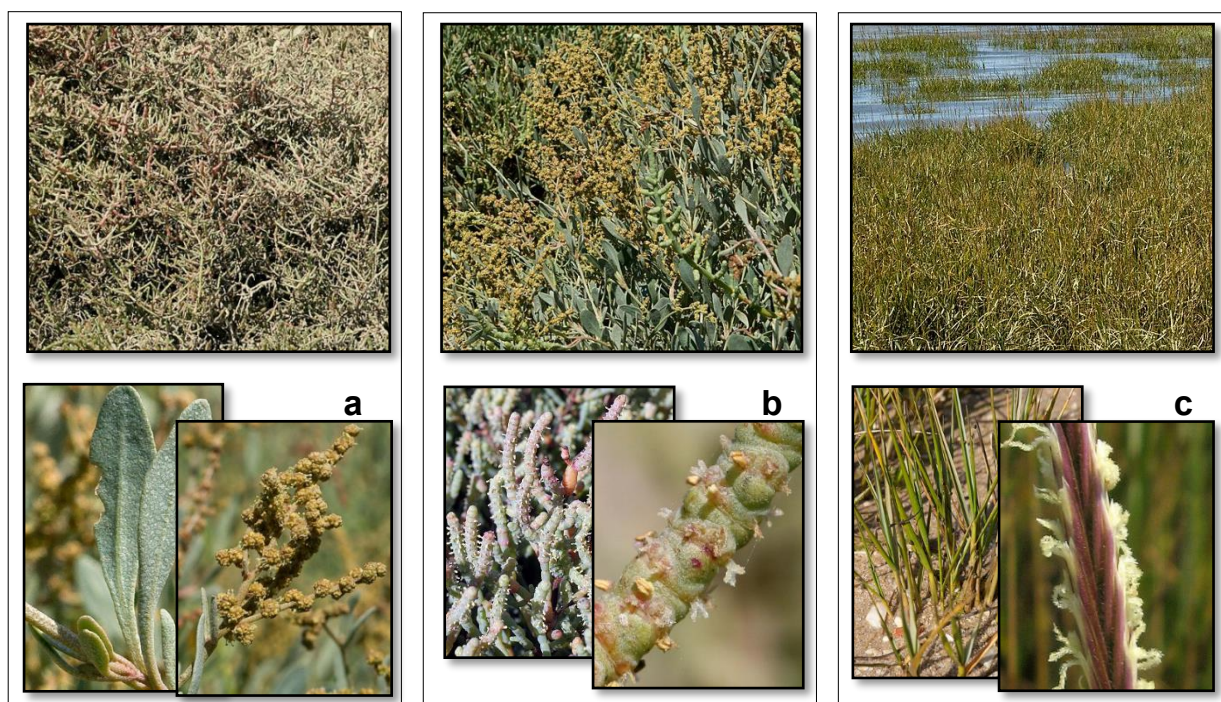


Figura 4.5. Plantas mais comuns no Sapal de Corroios: (a) *Halimione portulacoides*; (b) *Sarcocornia fruticosa*; (c) *Spartina maritima*: aspeto geral em cima e pormenores em baixo (Flora On, 2014).

4.1 GEOLOGIA, HIDRODINÂMICA, GÉNESE E EVOLUÇÃO

A dinâmica dos estuários está relacionada com a sua natureza transicional, entre os domínios terrestre e oceânico, originando fácies resultantes das ondas, das marés e da descarga fluvial. O Estuário do Tejo, classificado como mesotidal elevado, sofre a influência de marés semidiurnas, com amplitudes que variam entre os 0,75 m em maré morta, no exterior do estuário, e os 4,3 m em maré viva, na zona montante (Rilo et al., 2014). Na zona de Lisboa as marés variam entre os 1,5 m em maré morta média e os 3,2 m em maré viva média (Freire et al., 2013). O ciclo de maré é assimétrico e dominado pela vazante, sendo esta mais rápida do que a enchente. Em período de marés mortas o atraso entre as marés oceânica e a estuarina pode ser de duas horas (Silva et al., 2013).

Os sedimentos que alimentam o interior do estuário, de natureza silto-argilosa e transportados em suspensão, são maioritariamente de origem fluvial (Freire, 2003). O domínio subtidal do estuário interno é dominado pelos processos de assoreamento, principalmente a montante, ocorrendo erosão predominantemente nos canais principais, devido ao aumento da força das correntes e às operações de dragagem (Freire, 2003). O comportamento dos sedimentos silto-argilosos na coluna de água depende dos processos de floculação em suspensão, dos processos de consolidação no leito e das trocas entre estes dois domínios, cuja interface pode ser constituída por uma suspensão densa (lodo fluido), com concentrações da ordem dos 70 g/l. A concentração de sedimentos em suspensão nos níveis superiores da coluna de água é influenciada pela relação entre as direções relativas das correntes de maré e da propagação das ondas (Freire, 2003).

Os sedimentos arenosos de origem fluvial não chegam ao interior do estuário, situando-se em Cacilhas (Almada) o limite montante dos sedimentos provenientes do oceano, sugerindo que os sedimentos arenosos que alimentam as praias estuarinas terão origem local, resultante de erosão pluvial e hidrográfica dos afloramentos miocénicos, pliocénicos e quaternários enquadrantes, essencialmente da margem sul, por possuírem maior erodibilidade e por estarem mais expostos à agitação local (Freire, 2003). Outra fonte sedimentar destas praias será a troca de materiais com os rasos de maré e os canais, resultante das condições hidrodinâmicas no interior do estuário. A ressuspensão de sedimentos grosseiros de fundo por parte das ondas é mais frequente nas zonas pouco profundas, até dois metros, mas pode ir até 6 metros de profundidade, no fundo dos canais, em situação de ventos fortes (Freire, 2003). A deriva residual longitudinal nas praias, para o clima de agitação médio, faz-se para NE na zona do Samouco, para SW na zona da Base Aérea do Montijo e para SE na zona da Restinga do Alfeite (Freire, 2003).

A Restinga do Alfeite enraíza em formações plistocénicas (Silva, 2013) e ter-se-á instalado a partir da mobilização de materiais grosseiros provenientes de fontes próximas, provavelmente rochas detríticas miocénicas e pliocénicas aflorantes perto do canal de embocadura do estuário, na zona de Almada, sofrendo transporte curto (Freire, 2003). Apesar de se desenvolver numa zona abrigada da agitação das ondas oceânicas, terá sofrido influência da ondulação gerada no interior do estuário, suficiente para o desenvolvimento de praias e restingas na margem sul. Com distância de *fetch* de cerca de 13 km na orientação NNE-SSW, a altura das ondas que chegam à restinga varia entre 0,2 e 0,3 m, podendo chegar aos 1,3 m em situação de evento extremo (Freire et al., 2007). Uma alteração no regime de ventos há cerca de 500 anos (que pode estar relacionado com a Pequena Idade do Gelo na Península Ibérica, com condições mais frias e áridas que as atuais), terá contribuído para a sua instalação e crescimento graduais, por episódios sucessivos (sugeridos pela série de cristas transversais - **Figura 4.3**) sobre sedimentos de canal e de raso de maré, para leste da zona de enraizamento (Freire, 2003; Andrade e Freitas, 1998). Dados mais recentes apontam para uma maior longevidade da restinga, com uma datação da base do Sapal de Corroios, a quase 3 m de profundidade, correspondente ao intervalo entre Cal AD 80 e Cal AD 240 (Silva, 2013), o que significa que a restinga terá de ter idade superior a 1775 anos, porque tem de ser mais antiga do que o sapal (para que este tenha as condições de abrigo necessárias ao seu desenvolvimento).

O regime de agitação local promove o transporte sedimentar longitudinal para leste ao longo da praia do Alfeite. Os estudos de Freire (2003), apontam para a dominância de processos erosivos na restinga nos últimos 150 anos (mais fortes entre as décadas de 1930 e 1970), associados ao arqueamento da praia até 1993, processos que podem ser resultantes da construção de estruturas perpendiculares à costa a oeste (o Arsenal do Alfeite e os estaleiros da Lisnave), que terão impedido o transporte longitudinal dos sedimentos para alimentação da restinga. O hidrodinamismo local é também influenciado pela passagem diária e frequente de navios de transporte de passageiros, a cerca de 300 m a leste (para o cais do Seixal) e a nordeste (para o cais do Barreiro) da restinga (**Figura 4.2.b**). A Ponta dos Corvos sofre a influência de cerca de 165 passagens diárias de navios de passageiros (*catamarans*), de acordo com os horários da Transtejo de 2014 (média diária para as carreiras com origem e destino no Seixal e no Barreiro, não considerando a influência das carreiras do Montijo, mais distantes, a NE). A mesma fonte refere que o cais fluvial do Seixal terá sido inaugurado em 1997, tendo os *catamarans* começado a circular em 1998, substituindo os antigos navios, que circulavam mais lentamente, produzindo ondas mais fracas.

Na zona abrigada pela restinga, a Baía do Seixal, os fundos são constituídos essencialmente por vasas e vasas arenosas, com areias presentes apenas no canal do Rio Judeu (**Figura 4.4**), sendo os sedimentos em suspensão constituídos principalmente por siltes e

argilas (com importante componente orgânica, com possível origem nos detritos vegetais provenientes dos sapais), podendo incluir alguma areia fina. O modelo morfodinâmico desta zona é de redistribuição sedimentar controlada pelas marés, com acreção vertical nos sapais e rasos de maré mais elevados e erosão nos canais e rasos de maré mais baixos, não se verificando trocas significativas com o exterior da baía, a não ser em situações de eventos extremos (Freire, 2003). A taxa de sedimentação calculada para o sapal de Corroios (Silva, 2013) é de 0,6 mm por ano, atualmente superior à taxa de subida do NMM, mas a tendência futura poderá ser para o seu desaparecimento, dando lugar a ambientes de raso de maré, quando aquela taxa deixar de conseguir acompanhar as taxas previstas de subida do NMM.

4.2 HISTÓRIA

Desde muito cedo o Estuário do Tejo tem feito parte da vida quotidiana e da economia dos povos que aí se estabeleceram e transformaram as suas margens. A cidade de Lisboa e arredores desenvolveram-se em torno do estuário, que propiciou a sua prosperidade enquanto capital, que por sua vez gerou inúmeros vestígios de antigas ocupações, a norte e a sul do Tejo. As atividades ligadas à economia agro-marítima deixaram vestígios de ocupação humana desde o Paleolítico médio (artefactos em pedra lascada, de há 30 000 anos, encontrados na Ponta da Passadeira, Lavradio, na margem sul do estuário), passando pelo Mesolítico (os concheiros de Muge), pelo Neolítico/ Calcolítico (caso dos achados da Restinga da Ponta da Passadeira, relacionados com atividade oleira e produção de sal marinho), e pelos povos romanos (olarias na Quinta do Rouxinol, Miratejo, margem sul) e mais tarde os árabes.

As condições geomorfológicas da margem sul do estuário e a sua proximidade à capital fizeram com que, a partir do século XIII, fossem aqui erguidos os principais complexos de moinhos de maré do estuário, contando-se cerca de sessenta moinhos na margem sul no século XVI (Nabais, 1986). Durante milénios a atividade salineira foi uma das mais importantes fontes de rendimento de toda a região. O cultivo de ostras constituiu, até princípios da década de 70 do século passado, uma atividade muito importante, com 2,64 km² de extensas ostreiras, predominantemente entre Alcochete e Seixal (Gomes Ferreira, 2009).

4.2.1 Restinga do Alfeite

Na zona da Baía do Seixal existem vestígios de ocupação romana, datados dos séculos II a V, associados à indústria de construção de ânforas. Desenvolveram-se também nesta zona atividades ligadas à pesca, à agricultura, à indústria (com destaque para os estaleiros onde se

construíram caravelas e naus), à navegação (os vários portos distribuídos pela baía), à produção de sal, à piscicultura (ainda hoje funcionam dois viveiros), à seca de bacalhau e à moagem de farinha (tendo sido construído, em 1405, o primeiro moinho de maré, em Corroios, no extremo sudoeste do Sapal de Corroios, ainda hoje em funcionamento, integrado no Ecomuseu Municipal do Seixal). Hoje restam 10 moinhos de maré, todos eles desativados e quase todos privados. Mais recentemente surgiram construções ligadas a atividades militares (as bases do Alfeite e de Vale de Zebro), industriais (com destaque para a Siderurgia Nacional), e urbanas (com destaque para a ETAR da Quinta da Bomba, que desagua no Sapal de Corroios) (Baía do Seixal, 2014).

Entre os séculos XVI e XVIII foram construídos, na zona mais abrigada da restinga, a sul, quatro moinhos de maré (**Figura 4.6**), agora em ruínas e classificados de Interesse Público pelo Instituto Português do Património Arquitectónico (IPPAR, atualmente IGESPAR). De acordo com o *website* do IGESPAR, os moinhos terão sofrido grandes obras de reconstrução a partir do século XVIII, após o sismo de 1755, comprovando a influência deste evento na zona em estudo. As suas caldeiras (**Figura 4.7**), entretanto abandonadas, encontram-se atualmente em fase de assoreamento e colonização por vegetação halófitas, num processo de transformação em sapais.



Figura 4.6. Localização dos quatro moinhos de maré da Restinga do Alfeite (Raposo et al., 2013).

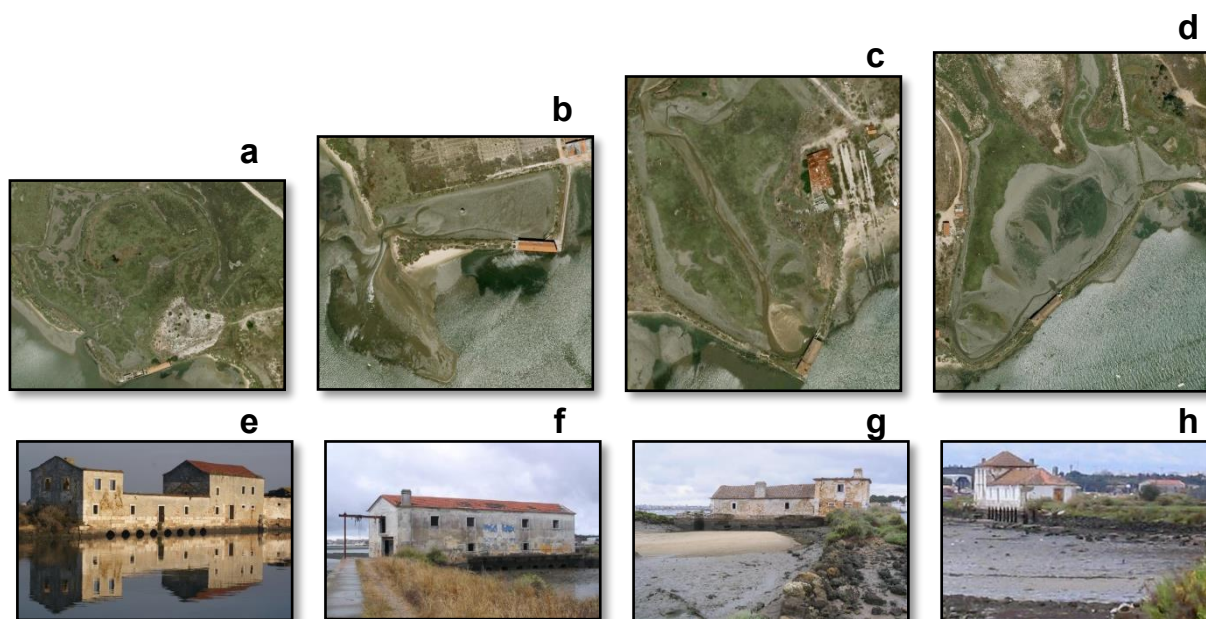


Figura 4.7. Moinhos de maré e respectivas caldeiras, de W para E: (a) e (e) Moinho do Galvão; (b) e (f) Moinho do Capitão; (c) e (g) Moinho da Passagem; (d) e (h) Moinho da Torre (imagens a a d: Google Maps™ 2013; foto e: MyGuide, 2014; fotos f a h: IGESPAR, 2014).

As praias da restinga terão servido de área de lazer para os nobres proprietários das várias quintas existentes em torno da Baía do Seixal. Na Quinta do Antelmo, junto à raiz da restinga, inserida na Quinta Real do Alfeite, existe ainda um antigo lago de maré com cerca de 100 por 25 metros e 2 metros de profundidade, que terá tido função recreativa e que estaria ligado aos esteiros de Corroios por um sistema de comportas (Lima, 1997). Haveria também nessa época um canal de ligação dos esteiros ao Mar da Palha, mais tarde fechado pela construção da estrada de acesso à seca do bacalhau (Lima, 1997), concordante com duas imagens históricas da região, que retratam a restinga como sendo uma ilha (**Figura 4.8**), mas do qual não foram encontrados vestígios atuais.

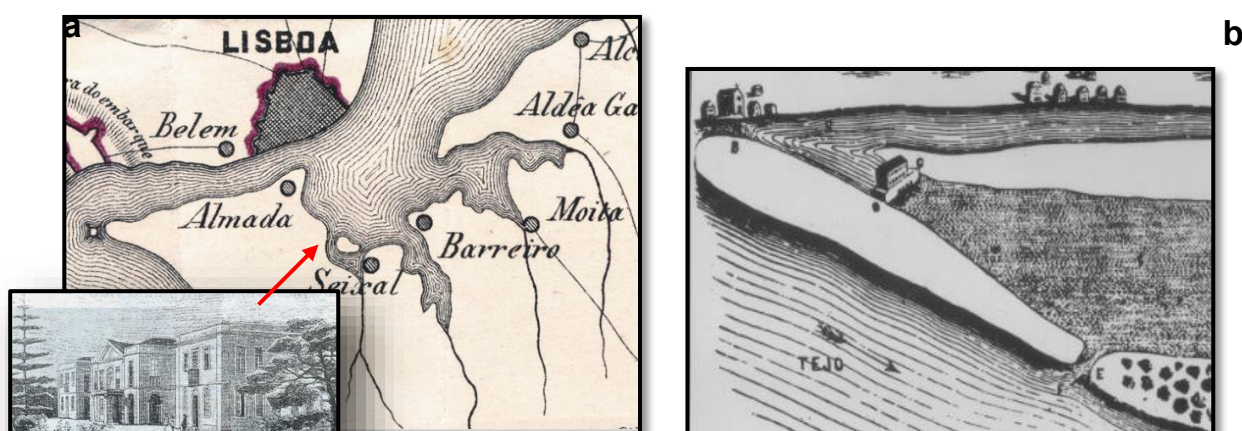


Figura 4.8. Representações antigas da Restinga do Alfeite: (a) 1874- *Diário Ilustrado*, Nabais (1986), com localização da Quinta Real do Alfeite; (b) 1810-1811 - *Mapa das Linhas de Torres Vedras* (Linhas de Torres Vedras, 2014).

Os moinhos e respetivas caldeiras, as manchas de antigos campos cultivados e os terrenos utilizados, mais tarde (entre 1917 e a década de 1990, de acordo com o *website* da Junta de Freguesia do Seixal), na indústria da seca do bacalhau (**Figura 4.9.a**), constituem o essencial da superfície da restinga que apresenta influência da atividade humana. Parte da estrada que terá servido de acesso para aquela atividade e que percorre a restinga de um extremo ao outro foi aterrada com materiais alóctones, de tom alaranjado, possivelmente pliocénicos (**Figura 4.9.b**).

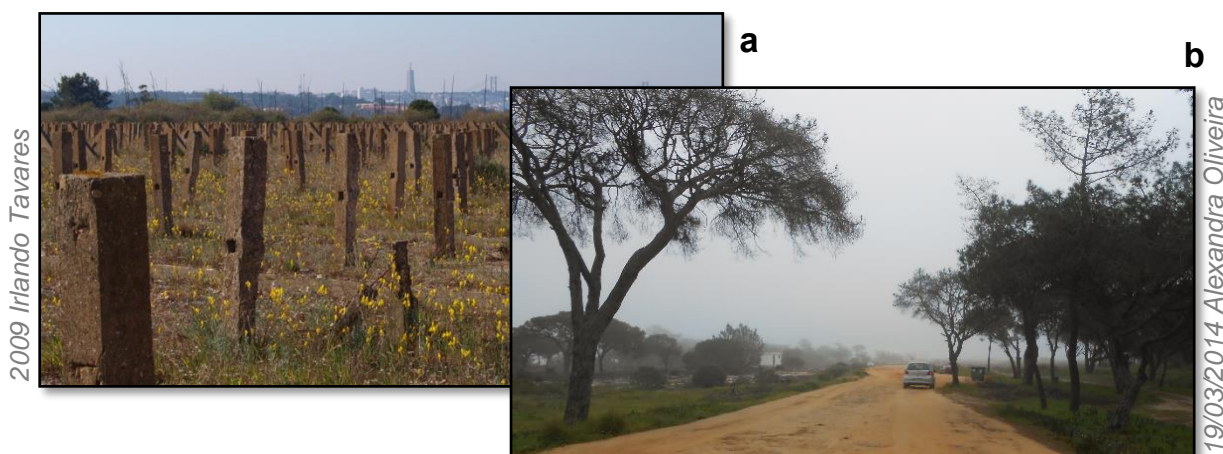


Figura 4.9. (a) Zona da antiga seca do bacalhau (Panoramio, 2014); (b) Aspeto dos materiais da estrada e da vegetação dunar arbórea.

Na Gazeta dos Caminhos de Ferro de 16 de Julho de 1903 (**Figura 4.10**), J. Fernando de Sousa assina um artigo que descreve o projeto que pretendia ligar, por via ferroviária, o Barreiro, o Seixal e Cacilhas, passando pela Restinga do Alfeite, exigindo para tal a construção de duas pontes sobre “os esteiros de Coima e do Seixal, ligadas por um dique ou aterro sobre terrenos cobertos pela praia-mar. (...) Em ambos há navegação de valor, indo buscar nelles commodo ancoradouro os navios empregados na pesca do bacalhau. (...) A cada uma das duas pontes foi dada a extensão de 90 m, representada por 4 vãos de 20 m e 1 de 10 m”, sendo este último móvel. “O dique, sobre o qual assenta a linha férrea, é constituído por aterro de talude, revestido com a largura de 15 m no coroamento”. O projeto, da autoria do Engenheiro Costa Serrão, ponderava também o aproveitamento da energia das marés nos diques construídos para as pontes.



Figura 4.10. Excerto da primeira página da Gazeta dos Caminhos de Ferro de 16-7-1903.

O blogue “Farol da nossa terra” refere a inauguração da via entre o Barreiro e o Seixal em 1923 e a construção da ponte sobre o rio Judeu (**Figura 4.11**), mas por motivos possivelmente ligados à construção do Arsenal do Alfeite, ou à falta de estabilidade dos terrenos da restinga, as obras que prolongariam a linha até Cacilhas terão sido interrompidas, tendo a ponte sido retirada e reaproveitada para substituição da antiga ponte de Alcácer do Sal.

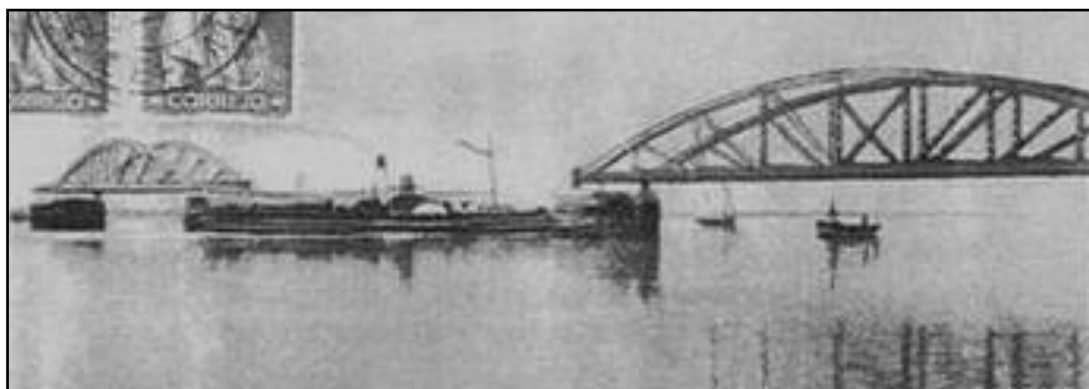


Figura 4.11. Antiga ponte sobre o Rio Judeu (Farol da nossa terra, 2015).

A construção do Arsenal do Alfeite entre 1928 e 1937, a oeste da restinga, e as suas ampliações nas décadas de 1970 e 1980, terão provocado grandes alterações nos sedimentos de fundo aquando das obras, para além de óbvias alterações nos regimes de transporte sedimentar local, interferindo no crescimento da restinga após estas datas (**Figura 4.12**).

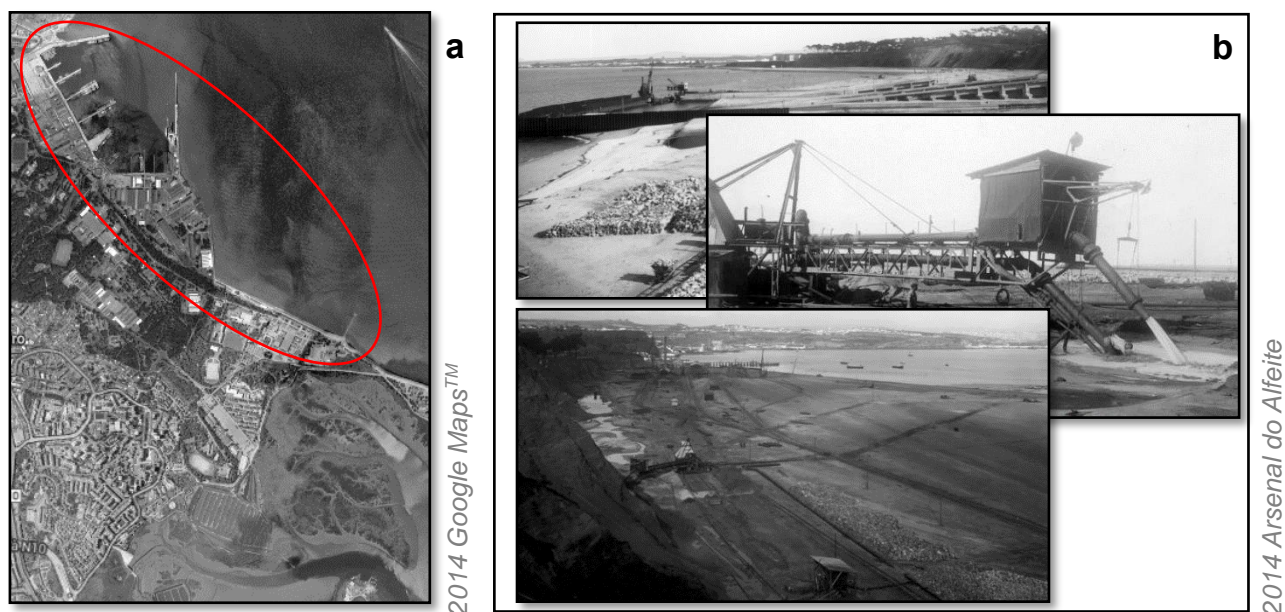


Figura 4.12. Arsenal do Alfeite: (a) Zona afetada; (b) Construção entre 1928 e 1937.

5. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho apresenta-se em duas fases principais, sendo a primeira caracterizada pelo desenvolvimento de um modelo de classificação de imagens de satélite de diferentes datas, com o objetivo de classificar as margens estuarinas associadas a uma restinga no Estuário do Tejo (a Restinga do Alfeite) e detetar modificações à mesoescala temporal numa zona marginal de pequenas dimensões. Após validação do modelo de classificação, uma segunda fase de aplicação pretende alargar a área de classificação a uma zona mais extensa, o estuário interior do Tejo, para detetar o mesmo tipo de modificações numa zona mais abrangente.

5.1 ÁREA DE TESTE (RESTINGA DO ALFEITE)

A escolha da região-modelo para representar as morfologias marginais do Estuário do Tejo recaiu sobre a Restinga do Alfeite e zona envolvente, por constituir uma zona representativa de todas as estruturas morfológicas importantes presentes no estuário: formações arenosas, como praias, dunas e bancos de areia; formações areno-vasosas, como rasos de maré arenosos e fundos de canais; e formações vasosas, como rasos de maré internos e sapais.

5.1.1 Delimitação da área de estudo

Com o objetivo de criar zonamentos correspondentes a cada tipo de ocupação do terreno, foi escolhida uma área suficientemente grande para conter todas as classes representativas a analisar e suficientemente pequena para ser facilmente trabalhada, sem os problemas de espaço e tempo associados a imagens complexas e muito pesadas. A zona escolhida para determinação das classes consiste num polígono irregular com cerca de 3,5 km de comprimento por 2 km de largura, abrangendo a Restinga do Alfeite com o banco de areia enraizado no seu extremo leste, o raso de maré externo na vertente norte da restinga, e parte do Sapal de Corroios abrigado na sua vertente sul (**Figura 5.1**). Assumiu-se para esta área os zonamentos: água; duna, praia e banco arenoso; raso de maré externo; raso de maré interno; sapal; vegetação dunar/ transição/ artificial. Todas as imagens foram cortadas com este polígono, utilizando a ferramenta *Extract by Mask* do programa Esri *ArcMap 10.1TM*.

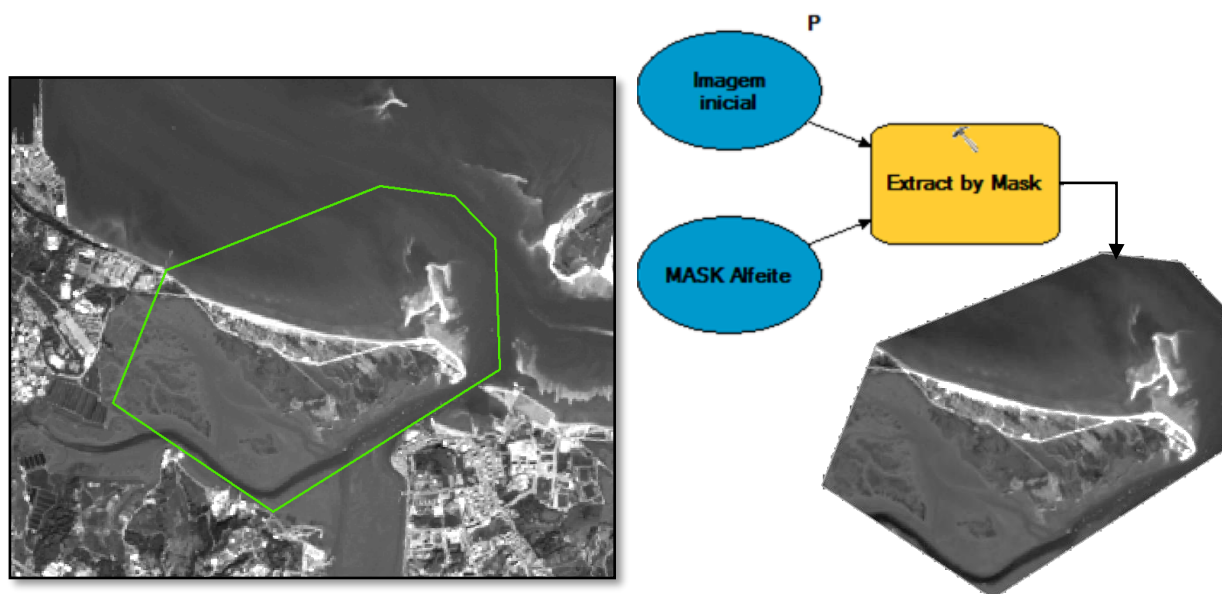


Figura 5.1. Polígono correspondente à área de estudo, ferramenta de corte (construída com a ferramenta Model Builder do ArcMap 10.1TM) e imagem cortada resultante.

5.1.2 Calibração do modelo

Paralelamente (e anteriormente) aos métodos de processamento e análise de imagens de satélite do programa Landsat, foram utilizados neste trabalho elementos auxiliares, que funcionaram não só como apoio na calibração e validação do modelo (determinação e delimitação das diferentes classes), como também como complemento à análise evolutiva das estruturas objeto deste estudo.

Google EarthTM

A sequência de imagens Google EarthTM (selecionadas entre as imagens de menor altura de maré utilizando a ferramenta “Histórico”: Agosto de 2002; Agosto de 2004; Março de 2007 e Julho de 2012), apresentada na **Figura 5.2**, mostra a evidente evolução que os bancos de areia associados à restinga têm sofrido ao longo da última década, alterando-se na forma, complexidade, quantidade de estruturas individuais e superfície emersa. É possível também distinguir, no raso de maré externo, migração dos canais areno-vascosos do fundo, comparando as imagens de 2004 e 2012. As imagens de 2002 e 2012 serviram como auxiliares das imagens Landsat de 2001 e 2013, na fotointerpretação para calibração (determinação e localização) das diferentes classes morfológicas.



Figura 5.2. Sequência de imagens do Google Earth™ para Agosto de 2002; Agosto de 2004; Março de 2007 e Julho de 2012, com representação do alinhamento inicial da forma superior do banco de areia (2002, a vermelho) e do mesmo alinhamento para as restantes datas (a azul).

Ortofotomapas

O ortofotomapa de 2007 constituiu uma ferramenta auxiliar na fotointerpretação para determinação e localização das diferentes classes morfológicas para a imagem de satélite de 2007 utilizada neste estudo (**Figura 5.3**).



Figura 5.3. Ortofotomapa de 2007 do IGP.

Fotografia aérea

A partir das fotografias aéreas georreferenciadas de 1955 e 1958 (cedidas pela Cátedra da Biodiversidade da Universidade de Évora) foram criados dois mosaicos, um de 1955 cobrindo apenas a zona dos bancos de areia na extremidade da restinga, e outro, de 1958, cobrindo a restante área de estudo (**Figura 5.4**). O levantamento de 1958, embora cobrindo a totalidade da restinga, foi obtido num momento de maré muito elevada, deixando submersos os bancos de areia e mostrando apenas uma estreita faixa de praia ao longo da restinga. O levantamento de 1958 foi obtido num momento mais favorável de maré, deixando parcialmente visíveis os bancos de areia, não tendo sido possível obter o prolongamento deste levantamento para ocidente. Foram digitalizadas, sobre os dois levantamentos, as manchas de praia e de banco de areia para a totalidade da área, obtendo-se uma praia bastante estreita na zona abrangida pelas fotografias de 1958.

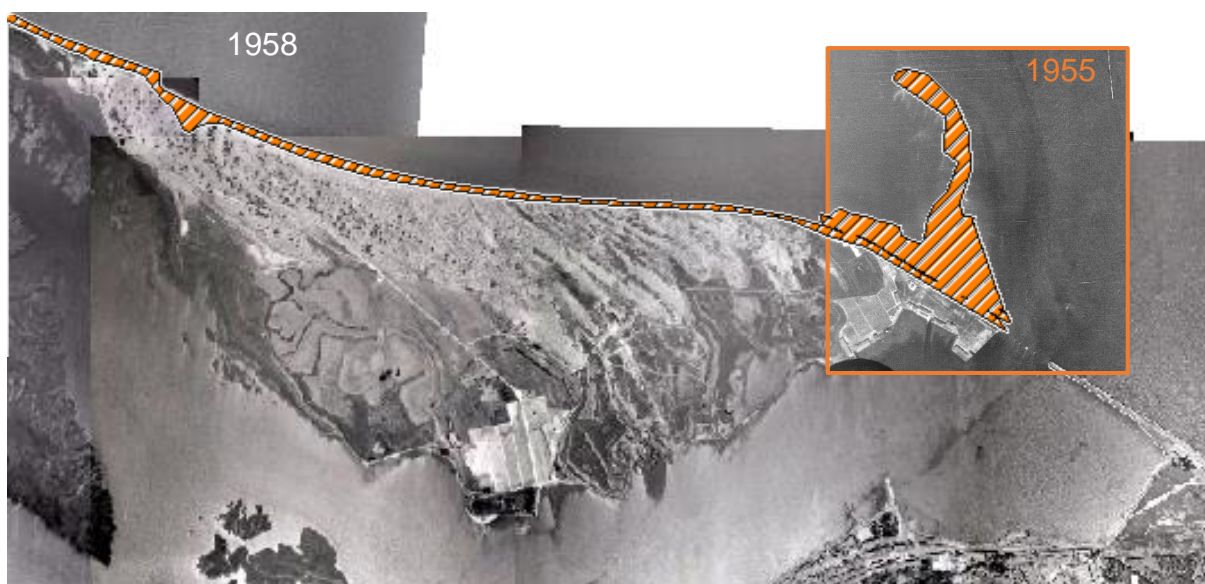


Figura 5.4. Vetorização da praia (1958) e do banco de areia (1955) sobre fotografias aéreas.

Levantamento topográfico

A 19 de Março de 2014 foi realizada uma campanha de campo na zona oriental da restinga, para adquirir fotografias e um levantamento topográfico com recurso a equipamento DGPS (*Differential Global Positioning System*) Leica GPS900™, equipado com sistema RTK (*Real Time Kinematic*), que permite obter precisão centimétrica resultante de correções de fase, com correlação espacial e temporal dos erros, através de ligação a estações GPS/GNSS de observação contínua (neste caso, à estação da DGT, em Lisboa, inserida no serviço ReNEP). O levantamento foi realizado em situação de baixa-mar de águas vivas, em simultâneo com a

passagem do satélite Landsat 8 às 11:16, com o intuito de comparar os limites entre classes obtidos no levantamento, com os mesmos limites observados através da análise da imagem de satélite. A nebulosidade verificada durante a passagem do satélite impediu no entanto a utilização desta imagem, tendo o levantamento dos limites dos bancos de areia servido para comparação com a imagem de satélite com a data mais próxima, de 10/10/2013 (com referência LC82040332013283LGN00). Os limites cartografados foram as transições entre areia seca (no corpo principal dos bancos arenosos), areia molhada (nas zonas mais baixas, sujeitas à subida da maré, apresentando valores de refletância mais baixos devidos à presença de água) e areia siltosa (na zona do raso de maré externo, com refletância ainda mais baixa). Estas transições mostraram-se difíceis de cartografar, devido à sua natureza muito gradual, verificando-se no entanto grande correspondência entre os limites cartografados e os limites posteriormente observados na imagem de satélite utilizada como referência para este trabalho (**Figura 5.5**).



Figura 5.5. Levantamento topográfico dos bancos de areia. Imagem base OLI compósita com as bandas 432 (cor verdadeira) de 10/10/2013.

Cartografia histórica

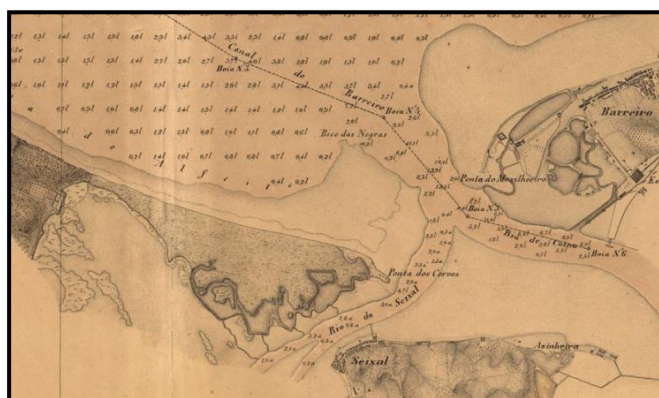
Para colmatar a ausência de informação fotográfica e de satélite em datas mais remotas, foram usadas algumas imagens cartográficas antigas, que permitem avaliar a evolução da restinga e zona circundante num intervalo temporal mais extenso. Grande parte destas imagens compiladas não apresentam qualidade ou rigor suficientes para contribuir com informação quantitativa, mas algumas apresentam características que podem revelar algum tipo de evolução do ponto de vista qualitativo:

- A carta representada na **Figura 5.6** revela, no ano de 1634, a presença de uma restinga que protege uma baía navegável e sem sapais;
- Nas imagens da **Figura 4.8** a Restinga do Alfeite surge como uma ilha, desligada da sua raiz, apresentando uma passagem direta do Mar da Palha para o interior da Baía do Seixal, passagem esta referida por Lima (1989) como um antigo acesso náutico à Quinta Real do Alfeite.



Figura 5.6. Cartografia antiga com indicação da localização da Restinga do Alfeite no ano de 1634 (Atlas de Pedro Teixeira, Barra y puerto de la ciudad de Lisboa, in *Campo Arqueológico de Tavira*, 2014).

As cartas da **Figura 5.7** aparentam um maior rigor, tendo sido selecionado, para georreferenciar e vetorizar, o Plano Hydrographico do Porto de Lisboa (**Figura 5.7.a**), publicado em 1878 (com levantamentos de 1845-1847), por apresentar individualização de vários tipos de elementos, ao contrário da Carta Chorographica dos Terrenos em Volta de Lisboa (**Figura 5.7.b**), menos pormenorizada. Foram individualizadas e vetorizadas, no Plano Hydrographico, as classes: “caldeiras de moinhos”; “corpo da restinga”; “praia e banco de areia”; “raso externo”; “raso interno”; “sapal” e “indefinido” (**Figura 5.8**), correspondendo este último a uma pequena mancha com simbologia ligeiramente diferente das restantes, que poderá corresponder a uma mancha de duna ligeiramente vegetada existente atualmente no mesmo local. A informação vetorizada é utilizada sobretudo do ponto de vista qualitativo, por não haver informação suficiente dos métodos utilizados na elaboração da cartografia, nem da altura de maré no momento do levantamento.



a



b

Figura 5.7. (a) 1878, Plano Hydrographico do Porto de Lisboa (Biblioteca Nacional, levantado em 1845-1847); (b) 1862, Carta Chorographica dos Terrenos em Volta de Lisboa (Biblioteca Nacional).

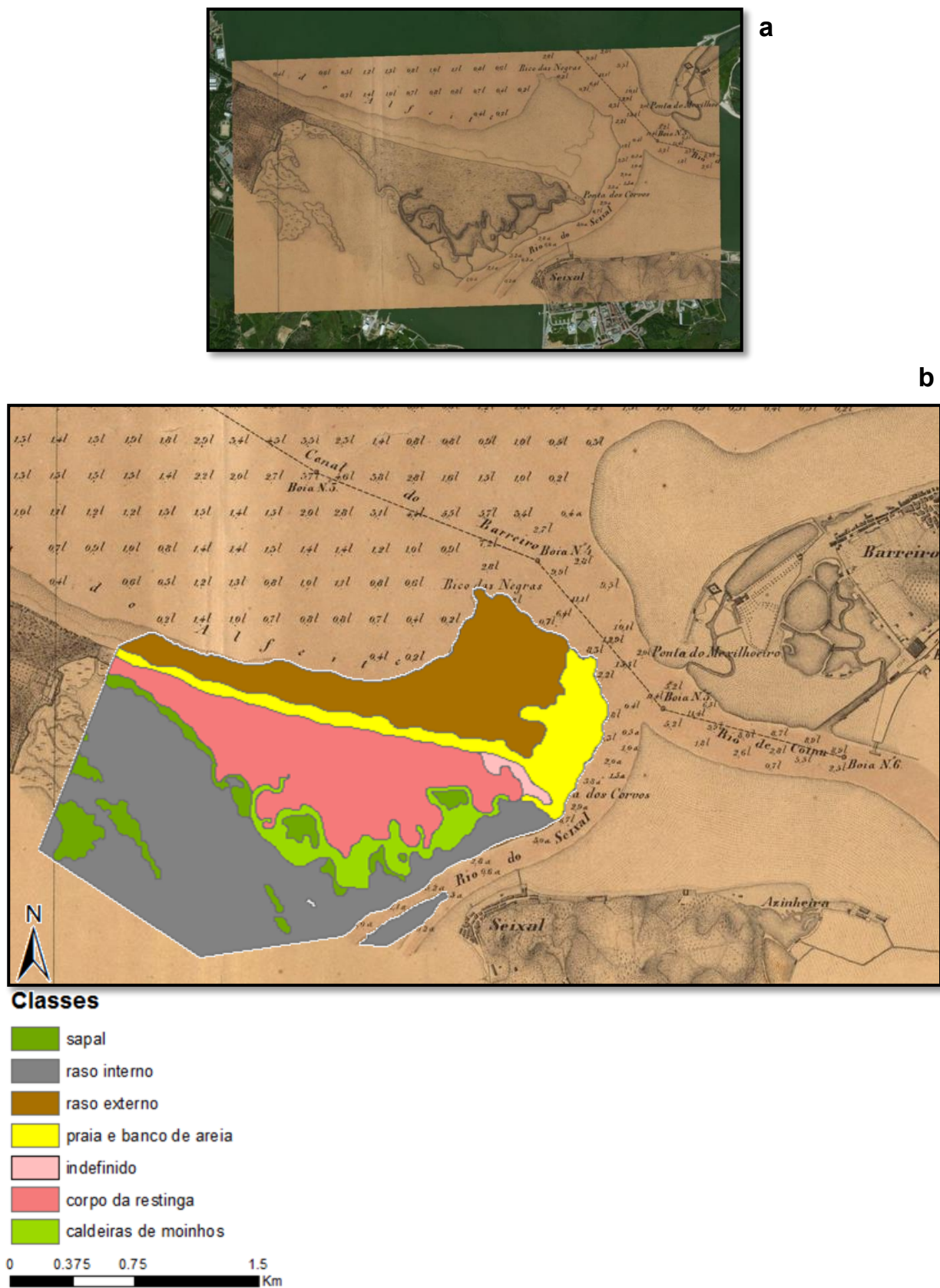


Figura 5.8. Georreferenciação (a) e vetorização (b) do Plano Hydrographico do Porto de Lisboa (Biblioteca Nacional, levantado em 1845-1847) em ArcMap 10.1™.

5.1.3 Escolha das imagens de satélite

O estudo de morfologias pertencentes a regiões sujeitas a variações de maré exigem imagens obtidas preferencialmente em momentos de baixa-mar de águas vivas equinociais, que permitem observar a maior superfície emersa dos elementos em estudo. Em zonas de transição, diferentes alturas de maré podem levar a resultados de interpretação errados, representando fronteiras entre os domínios aquático e terrestre que não correspondem a verdadeiras fronteiras morfológicas. Em estudos de comparação entre diferentes datas no mesmo local, é importante selecionar imagens que correspondam, não apenas à mesma hora do dia e mesma estação do ano (para que o ângulo de incidência da luz solar seja igual), como também à mesma altura de maré, o que nem sempre é fácil, devido à periodicidade e à escassez que por vezes se verificam relativamente a dados deste tipo (principalmente no caso de imagens mais antigas). Por outro lado, a informação acerca das marés não vem especificada nos metadados ou noutra informação associada às imagens, havendo a necessidade de comparar imagens entre si e escolher, visualmente, as que apresentam maior superfície emersa.

As imagens do programa Landsat têm a vantagem de incluir a totalidade do Estuário do Tejo em apenas uma imagem, facilitando o seu manuseamento e análise. Além disso, o carácter síncrono solar da sua órbita permite obter imagens com semelhantes ângulos de incidência da luz em diferentes dias e o relativamente curto tempo de revisitação no mesmo local permite o acesso a maior quantidade de informação por intervalo de tempo, características importantes na análise comparativa de imagens correspondentes a diferentes datas.

A escolha das imagens a utilizar neste trabalho realizou-se por observação direta no *preview* na secção *Landsat Archive* do *website EarthExplorer*, para a passagem (*path*) 204 e fila (*row*) 33, tendo sido escolhidas, entre as imagens isentas de nebulosidade, as de maior área visível de domínio intertidal ou entre marés (**Figura 5.9**).

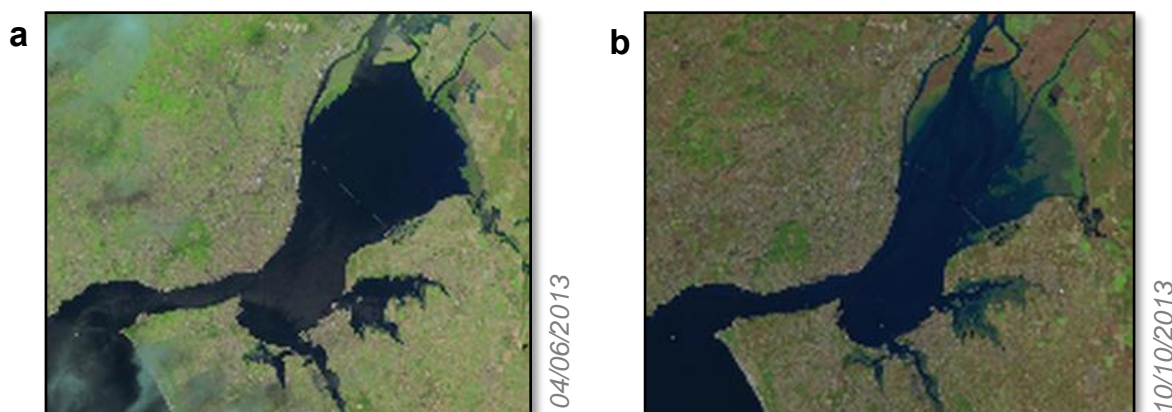


Figura 5.9. Comparação de duas imagens Landsat 8, uma com alguma nebulosidade e pouca superfície intertidal visível (**a**) e outra com as condições necessárias para ser escolhida para este estudo (**b**) (EarthExplorer, 2014).

Para a área de teste foram seleccionadas, de acordo com os critérios referidos, as imagens listadas na **Tabela 5.1**, no intervalo entre 1991 e 2013. A hora de aquisição é muito semelhante para todas as imagens (entre as 10:38 e as 11:16, consoante o satélite utilizado), resultando aproximadamente no mesmo ângulo de incidência da luz (apesar das diferenças resultantes das estações do ano). A resolução espacial é de 30 metros em todas as imagens escolhidas e todos os procedimentos foram realizados em *software* Esri ArcMap 10.1TM, no sistema de coordenadas WGS84 UTM Zone 29N.

Tabela 5.1. Imagens seleccionadas e respectivas características.

Referência	Satélite	Sensor	Data	Intervalo (anos)	Hora	Maré (m NMM)
LC82040332013283LGN00	Landsat 8	OLI/TIRS	10-10-2013	6	11:16	-0.96
LE72040332007243EDC00	Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	31-08-2007	6	11:04	-1.29
LE72040332001098EDC00	Landsat 7 (SLC-on)	ETM+	08-04-2001	6	11:05	-0.48
L5204000_00019910811	Landsat 5	TM	11-08-1991	10	10:38	-1.04

5.1.4 Escolha das bandas espectrais

Os sensores Landsat captam informação em diferentes intervalos do espectro eletromagnético, resultando nas imagens uni-banda disponibilizadas no *website EarthExplorer*, que podem ser combinadas entre si. A combinação de três bandas, representando as regiões vermelha, verde e azul do espectro visível (RGB), permite obter imagens compósitas, com informação variada para além da habitual foto-interpretação de imagens, que pode ser adaptada ao tipo de análise desejado. Podem ser combinadas mais de três bandas, ficando contida na imagem compósita a informação de todas elas, embora a informação visual (*display*) utilize apenas as três primeiras (RGB). A escolha da melhor combinação de bandas depende do terreno, do clima e da natureza do estudo (Sabins, 2000), embora estudos estatísticos revelem que combinações de dados nas zonas espectrais do infravermelho médio, infravermelho próximo e uma banda visível, ou em alternativa, uma no infravermelho próximo e duas no visível, são as que apresentam menor correlação entre si (Martínez Vega et al., 2010), acentuando as diferenças entre as várias morfologias representadas.

A combinação de bandas escolhida para distinguir as diferentes classes da zona de estudo foi, para as imagens OLI, 4567 e, para as restantes, 3457 (aproximadamente correspondentes às anteriores, de acordo com a **Figura 2.20**), resultando em imagens compósitas de falsa cor, que permitem realçar determinados aspetos da imagem (e distinguir entre as diferentes classes).

A primeira banda pertence ao intervalo do vermelho visível do espectro eletromagnético (na ordem dos 0,60 μm de comprimento de onda); a segunda pertence ao infravermelho próximo (na ordem dos 0,80 μm); a terceira (na ordem dos 1,60 μm) e a quarta (na ordem dos 2,20 μm) pertencem aos infravermelhos médios (as especificações de cada um dos tipos de imagem Landsat encontram-se detalhadas no **Anexo 1**). Foram, assim, excluídas desta análise as bandas correspondentes às cores visíveis azul e verde (bandas 2 e 3 nas imagens OLI e 1 e 2 nas restantes), que produzem maior quantidade de dispersão e absorção da luz incidente proveniente do Sol.

5.1.5 Pré-processamento das imagens

O processo de preparação das imagens para a fase de classificação começou pelo seu corte pela área de estudo descrita, seguida da composição das quatro bandas seleccionadas, utilizando a ferramenta *Model Builder* do *ArcMap 10.1™*. Esta ferramenta permite automatizar o procedimento, repetindo o mesmo conjunto de operações para diferentes imagens, de acordo com o modelo que se esquematiza na **Figura 5.10**.

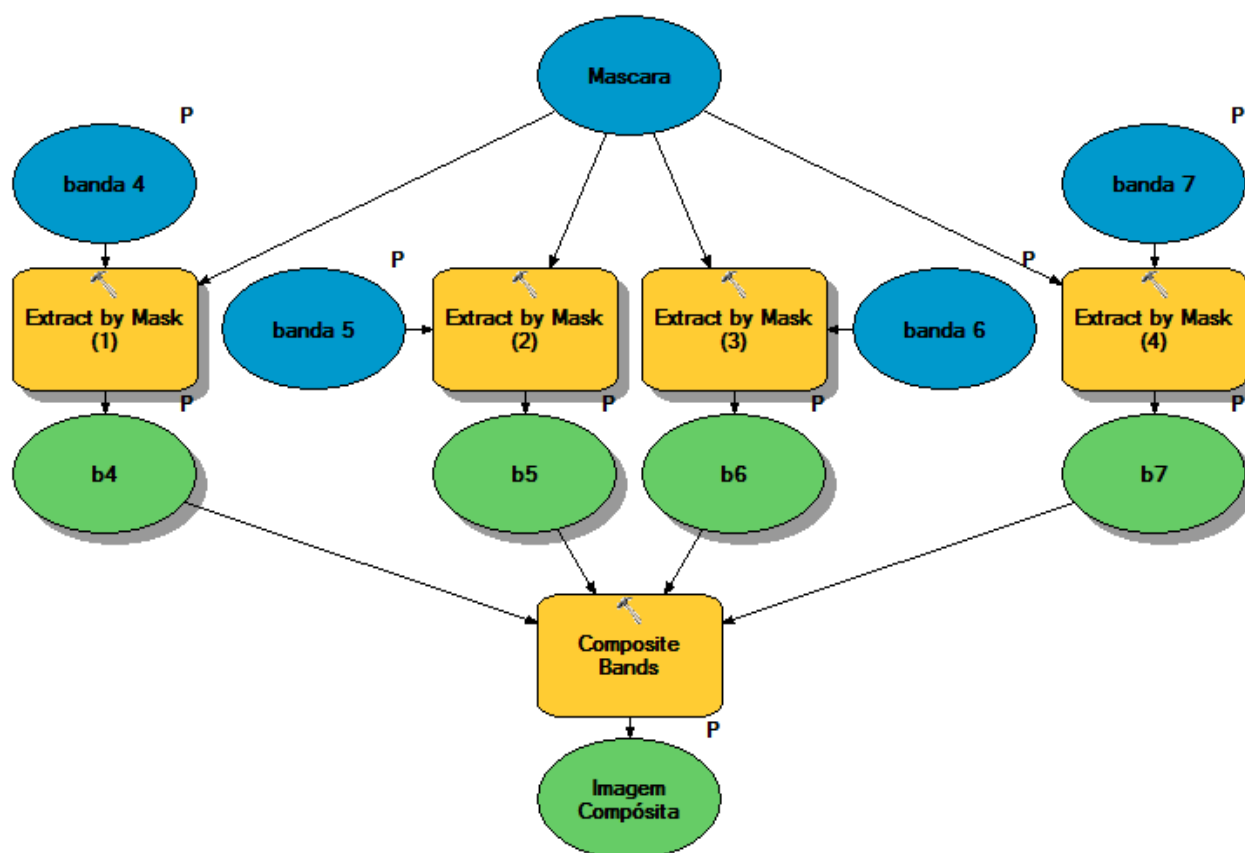


Figura 5.10. Esquema do modelo de pré-processamento para a imagem OLI de 2013, que pode aplicar-se também às imagens de 1991 e 2001, alterando-se as bandas 4, 5 e 6 para 3, 4 e 5.

Embora a imagem compósita resultante das imagens OLI uni-banda de 2013 (**Figura 5.11**) apresente, visualmente, apenas a informação das três primeiras bandas utilizadas (4, 5 e 6), a informação do infravermelho médio da banda 7 encontra-se presente no ficheiro resultante.

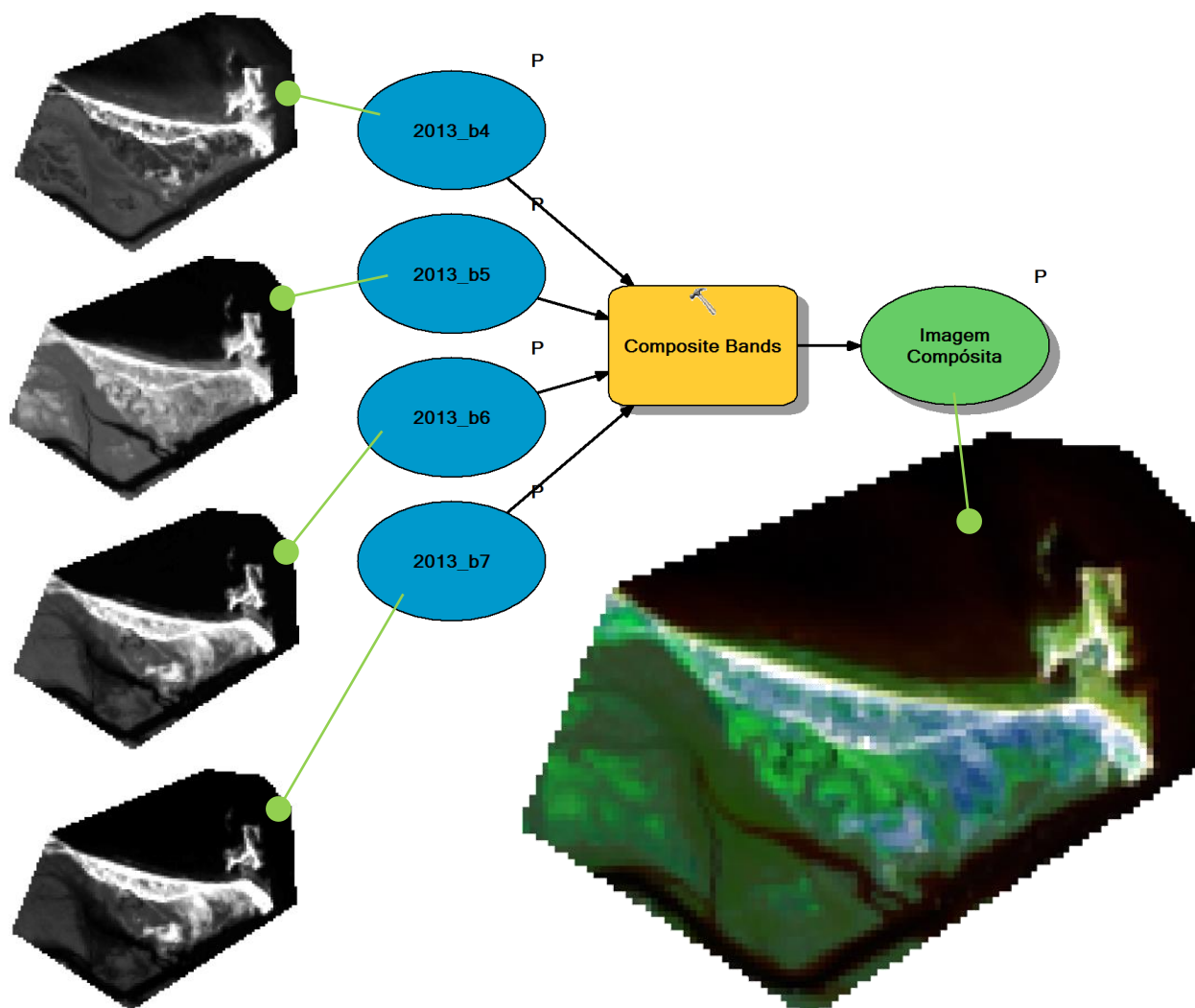


Figura 5.11. Utilização das bandas OLI 4, 5, 6 e 7 (Landsat 8) para criação de uma imagem compósita, com recurso à ferramenta Model Builder do ArcMap 10.1TM.

O procedimento mais complexo de pré-processamento na área piloto foi realizado para a imagem ETM+ SLC-off do satélite Landsat 7 (obtida após 31 de Maio de 2003, com a avaria do *Scan Line Corrector*), para a qual foi necessário excluir as zonas afetadas pelas linhas de erro (**Figura 2.17**), evitando desta forma a presença de píxeis com dados de refletância influenciados por essas linhas. Cada uma das bandas de cada data apresenta linhas de erro independentes, de forma que o *website* USGS disponibiliza, para este tipo de imagens, um ficheiro de correção para cada banda em cada data, designado por *Gap-Mask*, que vem associado às imagens

disponibilizadas online. Estes ficheiros contêm informação binária, em que o valor 1 corresponde à área com informação, e o valor 0 corresponde às linhas afetadas pelo erro, que devem ser excluídas da análise (**Figura 5.12**). Para que a imagem compósita final não apresente qualquer influência da presença destas linhas, é necessário excluir a totalidade da área da imagem afetada por elas, bastando para isso multiplicar entre si os quatro ficheiros *Gap-Mask* (correspondentes às quatro bandas utilizadas), aumentando a área a excluir, usando a propriedade do elemento nulo na multiplicação. O ficheiro resultante é então multiplicado por cada uma das imagens uni-banda, excluindo a totalidade da área afetada pela avaria.

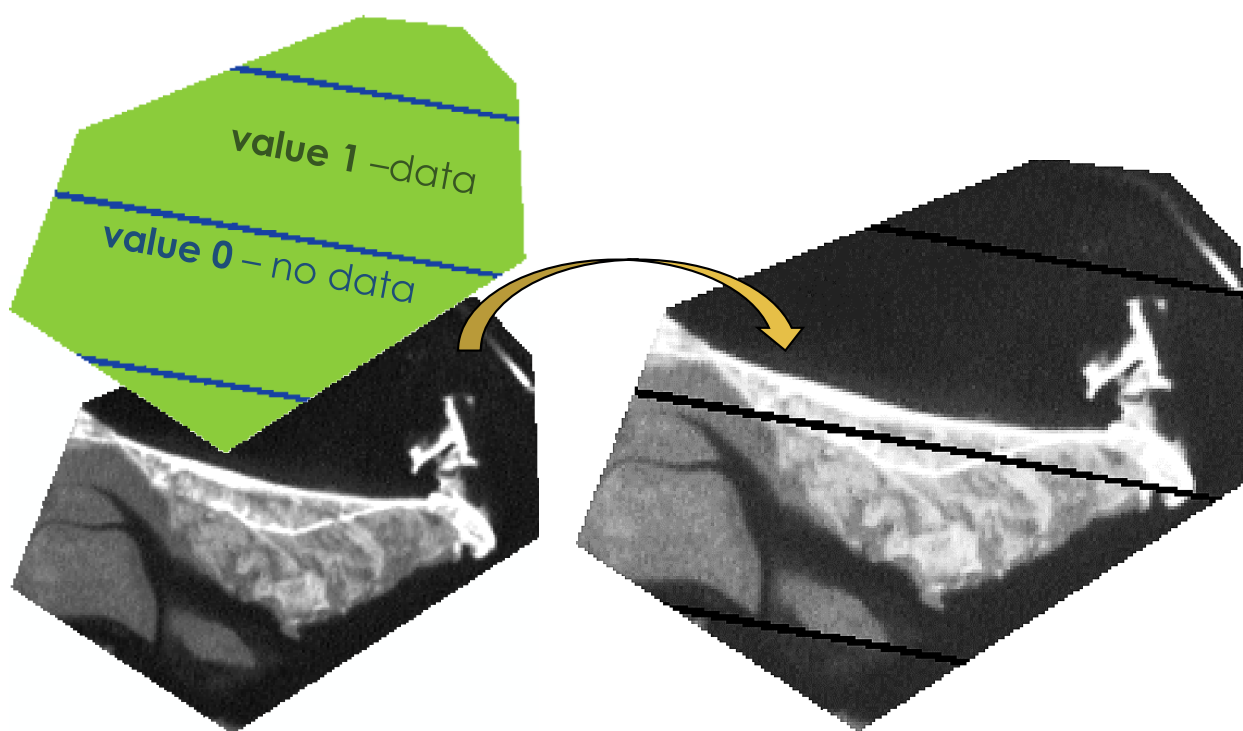


Figura 5.12. Utilização da Gap Mask disponibilizada pelo USGS para retirar das imagens SLC-off as linhas resultantes da avaria no SLC.

A construção do modelo geral para todo o pré-processamento, no *Model Builder*, pode ser observada na **Figura 5.13**. Foi atribuída a cada uma das entradas de dados a característica de parâmetro (*Model Parameter - P*), para que esta informação possa ser introduzida no início de cada utilização do modelo.

A fase de pré-processamento resultou nas imagens compósitas finais, semelhantes à da **Figura 5.11**, a utilizar no processo de classificação das imagens na fase de processamento.

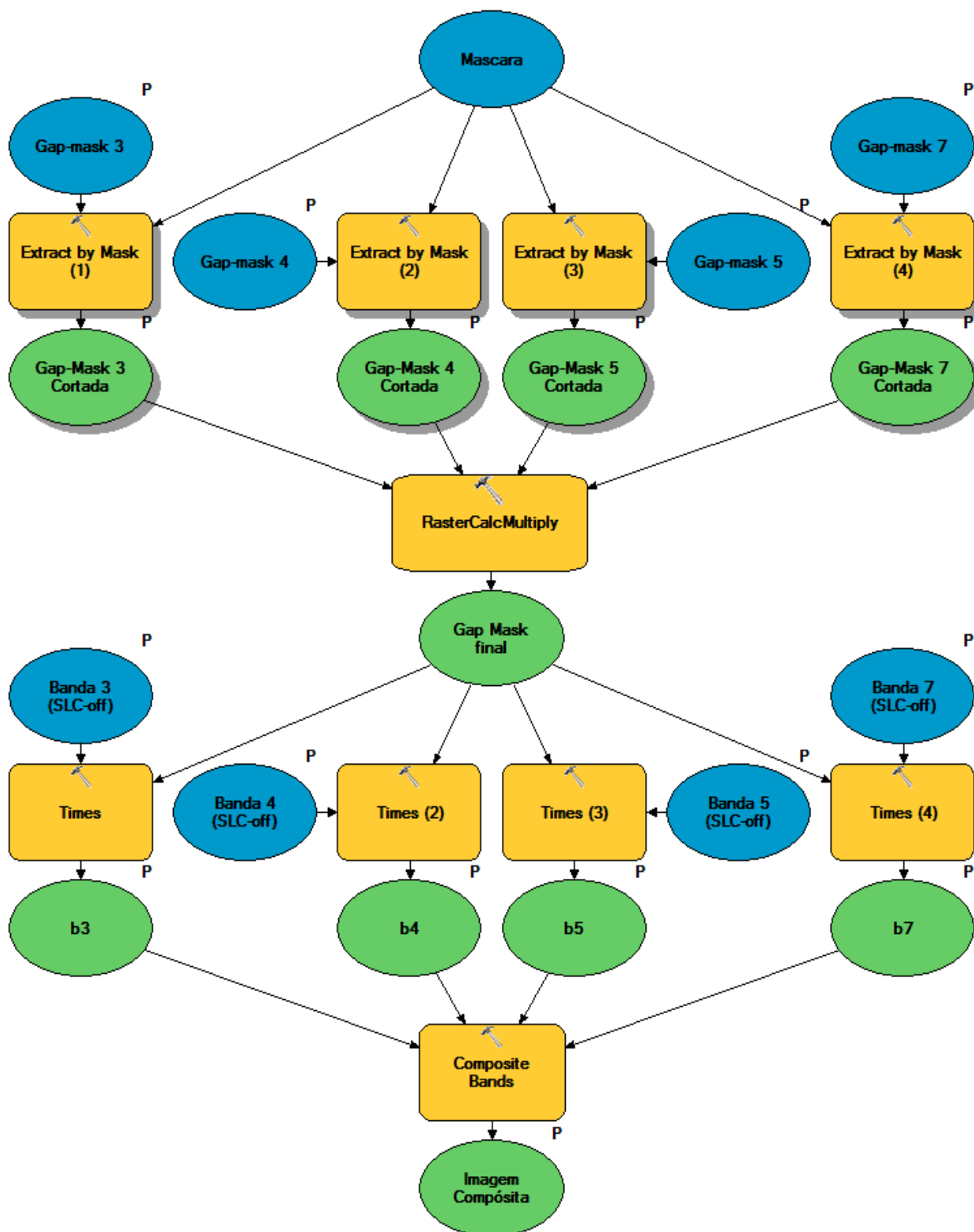


Figura 5.13. Esquema do modelo de pré-processamento para as imagens SLC-off.

5.1.6 Processamento (Classificação)

Após visita ao terreno e observação das imagens auxiliares, foi possível definir as classes de ocupação da zona de estudo, o que permitiu optar por um método de classificação assistida, utilizando o conhecimento prévio das classes. Foram inicialmente definidas sete classes, entre elas as classes de “baixo sapal” e “alto sapal”, cuja distinção seria feita com base nas diferentes refletâncias apresentadas pelas diferentes espécies de plantas halófitas predominantes em cada um destes subdomínios. A forte irregularidade resultante da alternância entre espécies ao longo do mesmo perfil (Caçador e Duarte, 2012) obrigou à fusão destas duas classes, por se revelar de grande dificuldade a sua distinção, não só a nível de fotointerpretação, mas também no processo semi-automático de classificação.

Foram assim definidas seis classes para representar a ocupação dominante da Restinga do Alfeite e zona circundante (**Figura 5.14**), sendo cada classe designada por:

- “água”;
- “duna, praia e banco arenoso”, constituída por areia;
- “raso de maré externo e canais principais”, constituída por areia siltosa;
- “raso de maré interno”, constituída por silte argiloso;
- “sapal”, constituída por vegetação halófito sobre vasa;
- “vegetação dunar/transição/ artificial”, constituída por áreas antropizadas (moinhos de maré e respetivas caldeiras; estradas; antigas secas do bacalhau; parques de estacionamento; equipamentos militares), árvores e vegetação herbácea dunar.

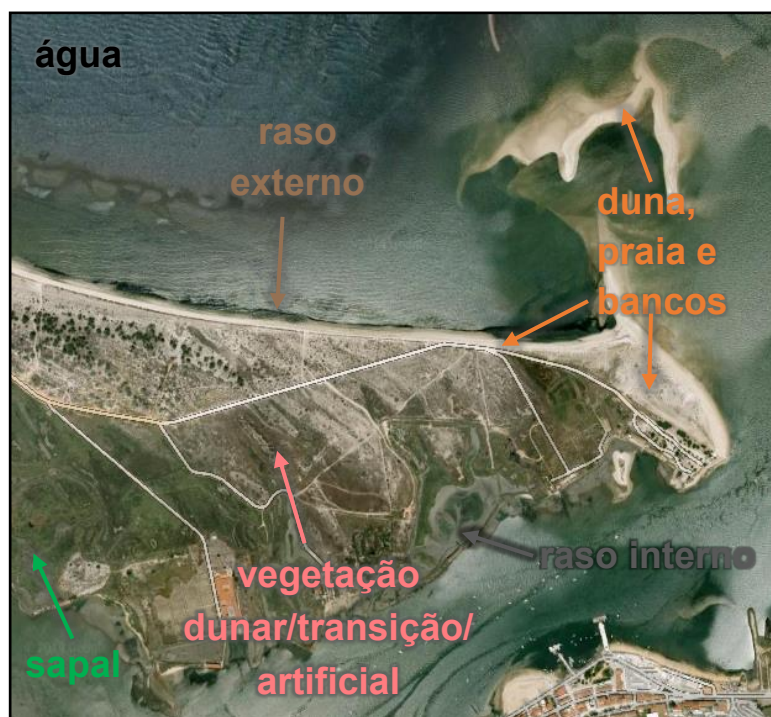


Figura 5.14. Classes escolhidas para o zonamento da restinga, sobre imagem Google Earth™ atual.

A distinção entre as diferentes classes representativas de sedimentos foi apoiada nos estudos de Andrade e Freitas (1998). O agrupamento da última classe descrita deve-se à grande

difficuldade do classificador de distinguir automaticamente cada uma das classes heterogéneas constituintes.

Partindo da imagem compósita com as bandas OLI 4, 5, 6 e 7 (Landsat 8) foram definidas as amostras de treino, através da ferramenta *Classification* do ArcMap 10.1™, utilizando a função *Training Sample Manager*, que permite traçar polígonos representativos de cada uma das classes pré-definidas, criando um ficheiro de assinatura (Figura 5.15).

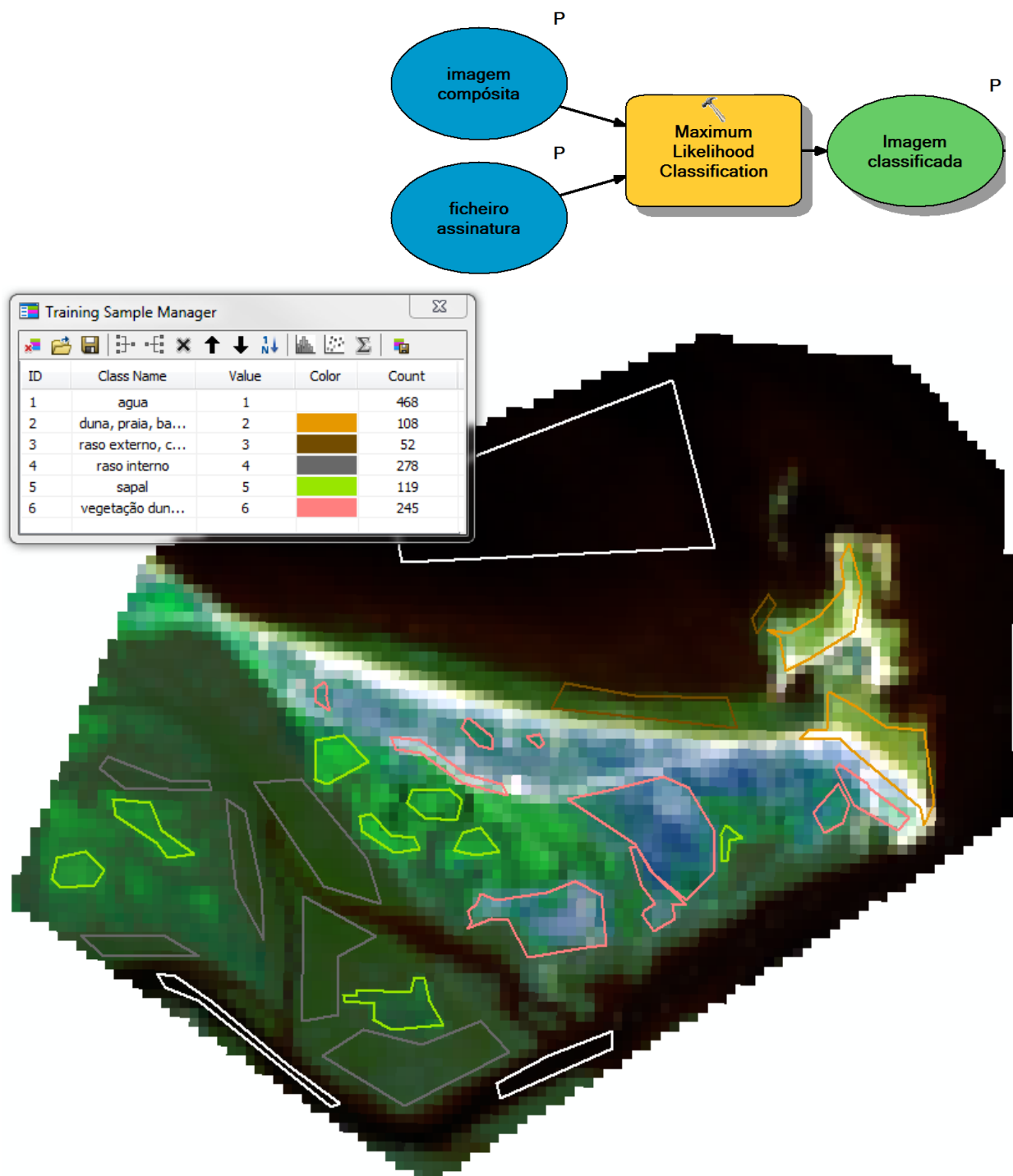


Figura 5.15. Amostras de treino para a imagem compósita de 2013 (OLI, bandas 4, 5, 6 e 7).

O ficheiro de assinatura foi utilizado como amostra de treino para o classificador, que transforma em classes as refletâncias semelhantes às representadas dentro de cada polígono, utilizando o método estatístico assistido máxima verosimilhança. Através deste método, a probabilidade de determinado píxel pertencer a determinada classe (definida pela amostra de treino) depende da distância ao centro dessa classe e da dimensão da classe. A partir das amostras de treino o programa classifica a totalidade dos píxeis na área de estudo (**Figura 5.16**).

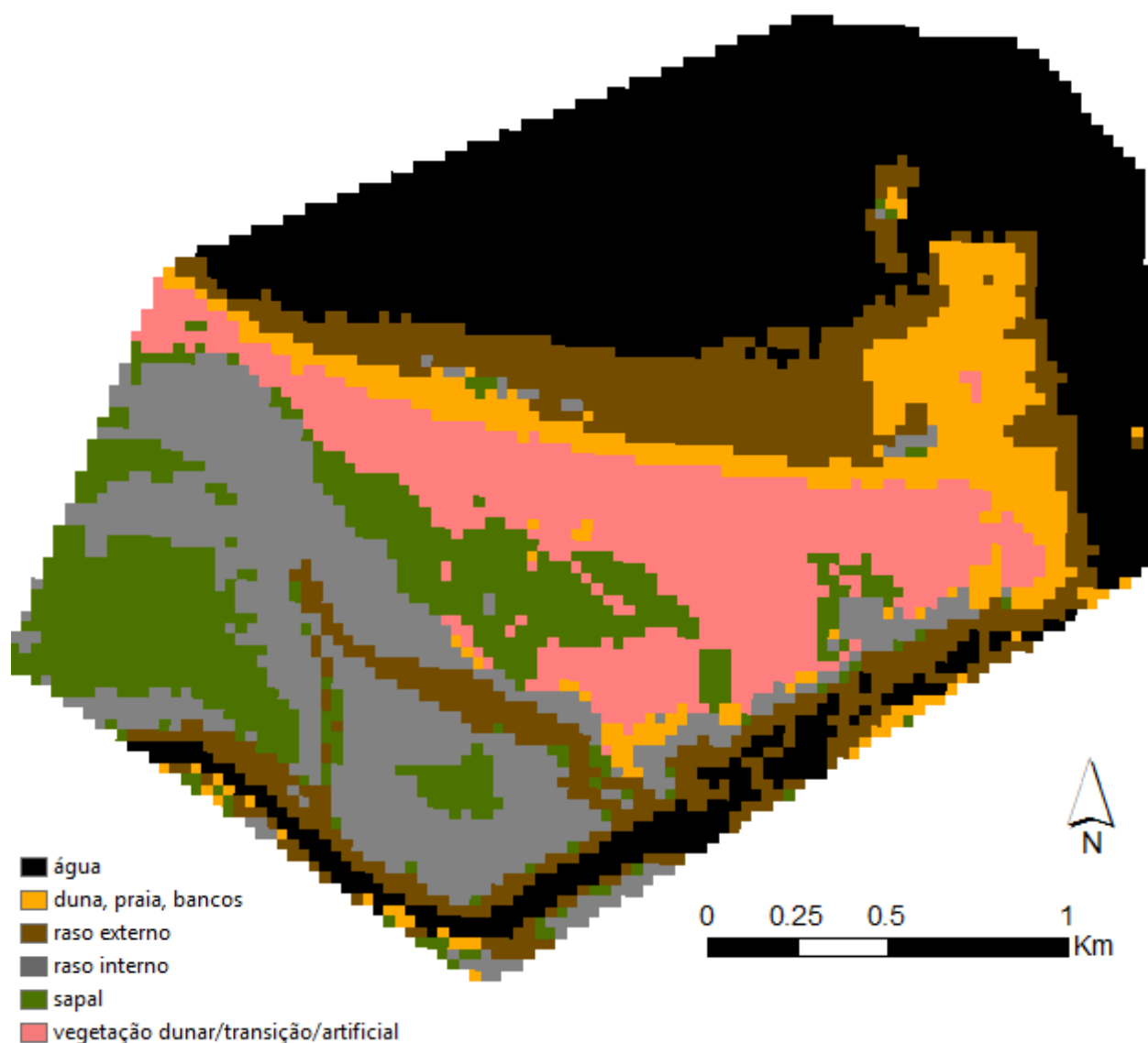


Figura 5.16. Classes geradas pelo classificador máxima verosimilhança para a imagem compósita de 2013.

5.1.7 Pós-processamento (Generalização)

Para remover o aspeto fragmentado das imagens classificadas, foi utilizado um filtro de generalização, com a função de substituir os valores de cada *píxel* com base na maioria dos *píxeis* vizinhos contíguos. Foi escolhida a ferramenta *Majority Filter no ArcMap 10.1™*, com a opção de 8 vizinhos e o limite de substituição com base em metade dos *píxeis* (opção *Half Replacement Threshold*), que exige que apenas metade dos *píxeis* vizinhos tenham o mesmo valor para que o valor da célula a calcular seja substituído. O filtro foi aplicado três vezes para maior homogeneização da imagem (**Figura 5.17**).

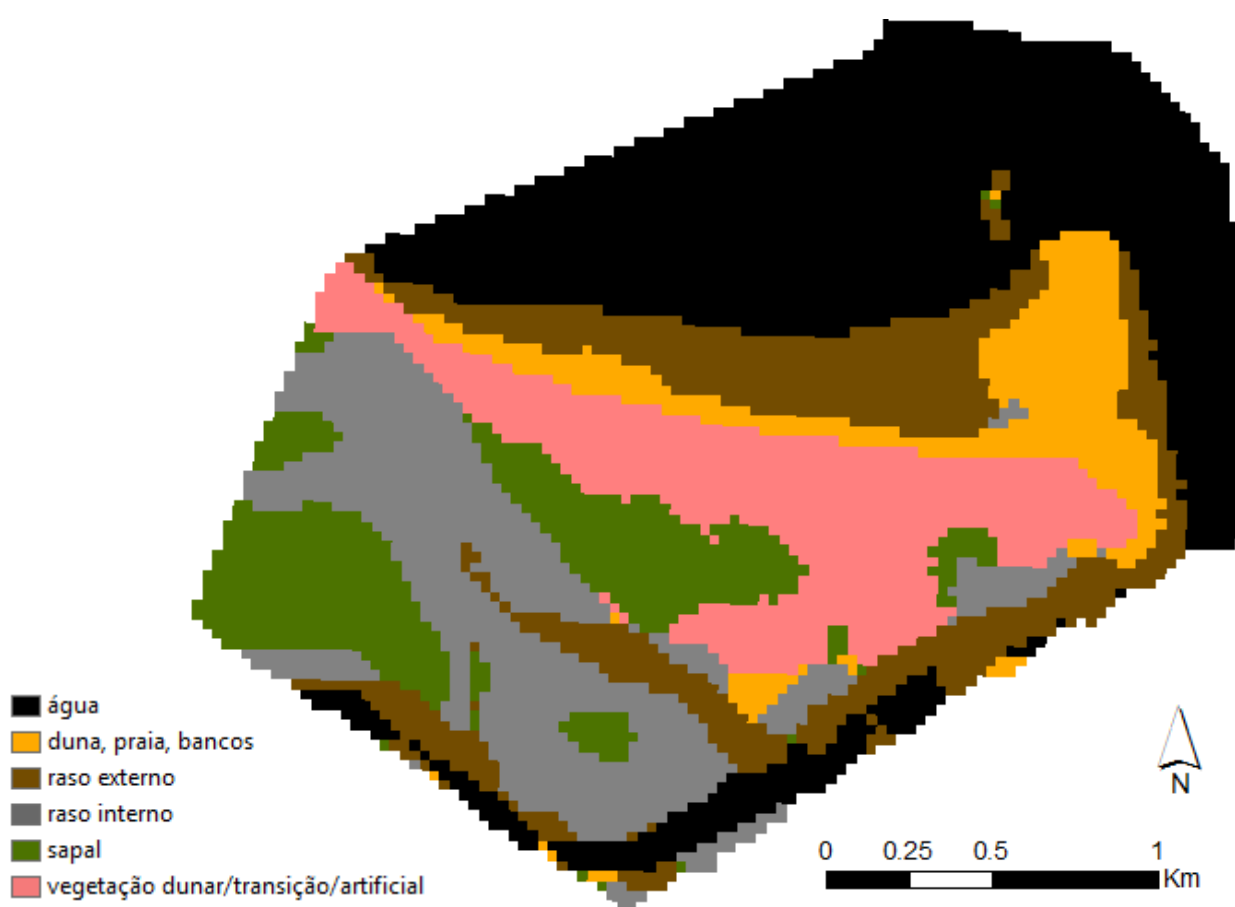


Figura 5.17. Imagem resultante da aplicação tripla do filtro generalização na imagem classificada da **Figura 5.16**.

Os passos descritos foram repetidos para cada uma das datas estudadas, incluindo a criação de um ficheiro de assinatura para cada imagem. As ferramentas principais resultantes deste trabalho são os dois modelos construídos com recurso à ferramenta *Model Builder* do *ArcMap 10.1™*, para realizar automaticamente todas as tarefas descritas. Sendo impossível realizá-las apenas com um modelo, um primeiro modelo executa todo o pré-processamento para

cada uma das datas, criando as imagens compósitas para classificar (**Figura 5.10** ou **Figura 5.13**, consoante se trata de imagens sem ou com avaria SLC-off). Sobre estas é definido, por fotointerpretação e desenho de polígonos, um ficheiro de assinatura para cada data analisada, que será utilizado no segundo modelo (**Figura 5.18**), juntamente com a imagem compósita respetiva, resultante do primeiro modelo. O segundo modelo faz o processamento (a classificação) e o pós-processamento (a generalização) das imagens.

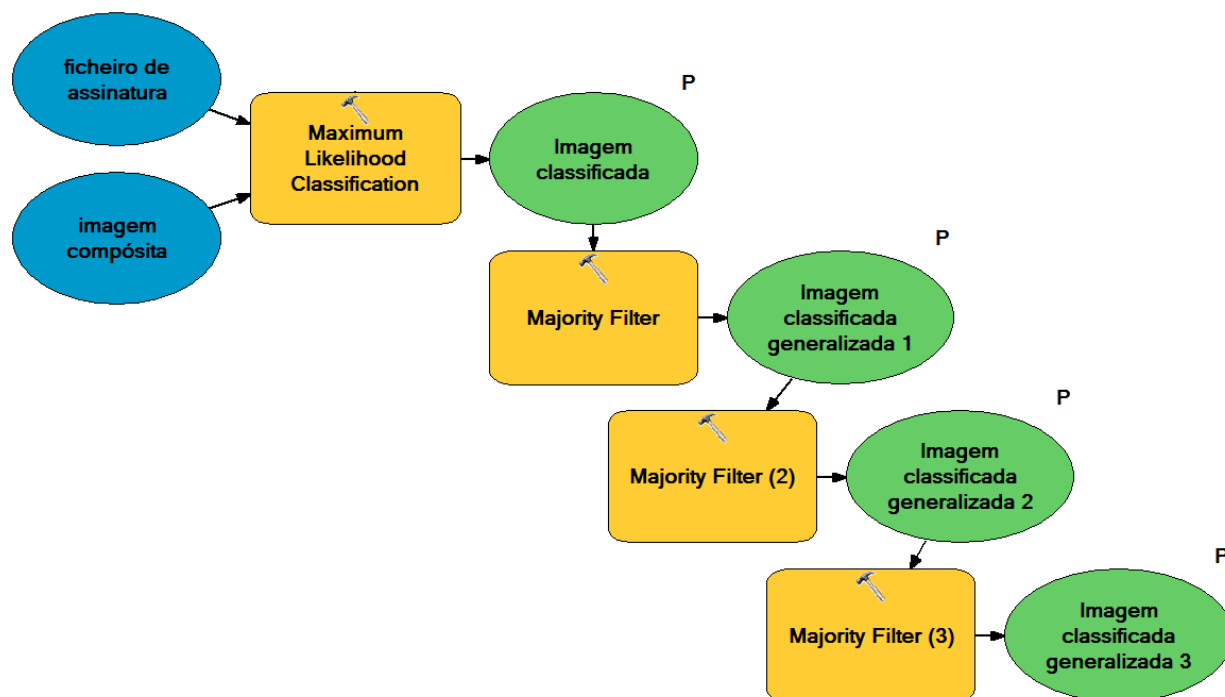


Figura 5.18. Modelo para as fases de processamento (classificação) e de pós-processamento (generalização), construído com a ferramenta Model Builder do ArcMap 10.1™.

5.1.8 Avaliação da precisão da classificação

Para avaliar a qualidade do processo de classificação das imagens, foi necessária a construção de um *ground truth* da área de estudo, utilizando-se para tal a banda 8 (pancromática, com 15 metros de resolução espacial) da imagem OLI Landsat de 10/10/2013. Sobre esta imagem foi realizada fotointerpretação de todos os elementos da zona de teste, que incluiu a Restinga do Alfeite e zona envolvente, usando a imagem georreferenciada atual do Google Earth™ como auxiliar, devido à sua maior resolução espacial. Criou-se, desta forma, um ficheiro

de polígonos vetorizados (**Figura 5.19.a**) com as seis classes definidas anteriormente. Para excluir as zonas de fronteira, onde se situam os píxeis indefinidos que dão origem aos maiores erros de precisão, a cada um dos polígonos foi aplicado um *buffer* de 15 metros (distância que representa metade da resolução espacial das imagens, sendo equivalente a meio píxel na imagem) (**Figura 5.19.b**).

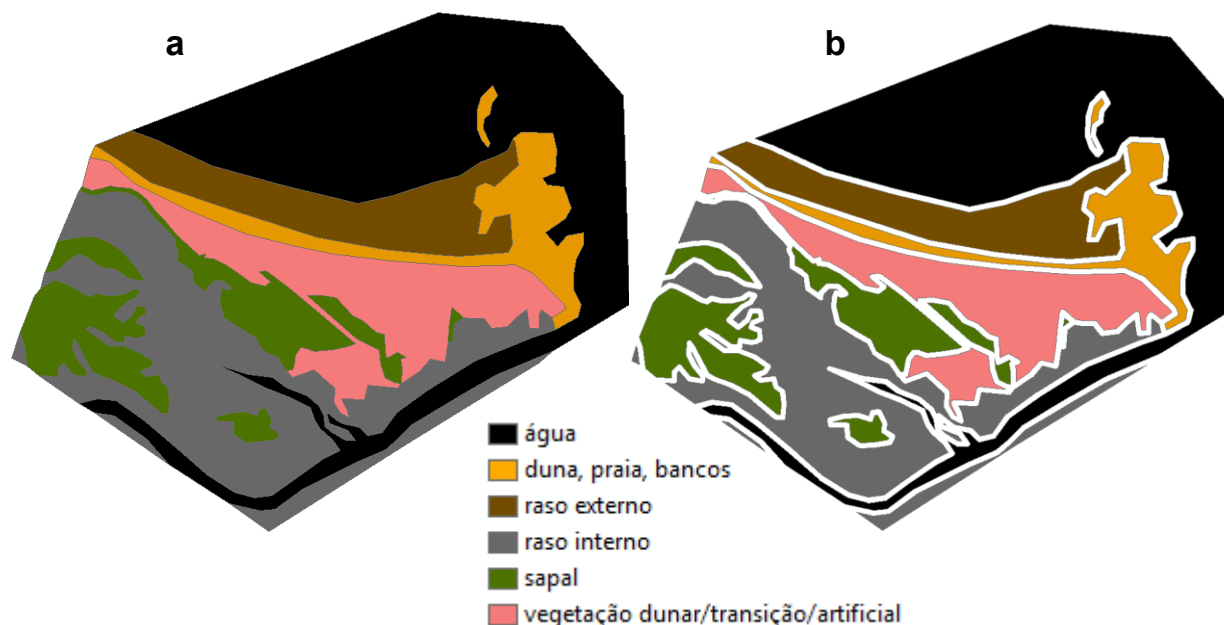


Figura 5.19. (a) Ground truth sob a forma de polígonos vetorizados por fotointerpretação sobre a imagem OLI Landsat de 2013 (banda 8); (b) Os mesmos polígonos, com exclusão de 15 metros nos seus limites (*buffer*).

Os polígonos criados desta forma foram utilizados como máscaras de corte na imagem previamente classificada de 2013, utilizando um modelo construído com a ferramenta *Model Builder*, esquematizado na **Figura 5.20** e resultando nos polígonos individuais representados na **Figura 5.21**.

A contagem de píxeis corretos e incorretos foi efetuada no separador “*Symbology*” na janela “*Layer Properties*” de cada um dos ficheiros resultantes após o respetivo corte, considerando-se corretos apenas os que correspondem à respetiva classe, sendo incorretos todos os restantes (**Figura 5.21**). Os valores obtidos desta forma serviram para alimentar uma matriz de confusão realizada em *Excel*, utilizando os cálculos descritos em Liu e Mason (2009), com representação dos valores classificados em colunas e dos valores fotointerpretados (*ground truth*) em linhas (**Tabela 5.2**). A precisão global da classificação determina-se pelo quociente entre o valor total de píxeis corretamente classificados e o número total de píxeis da área de estudo.

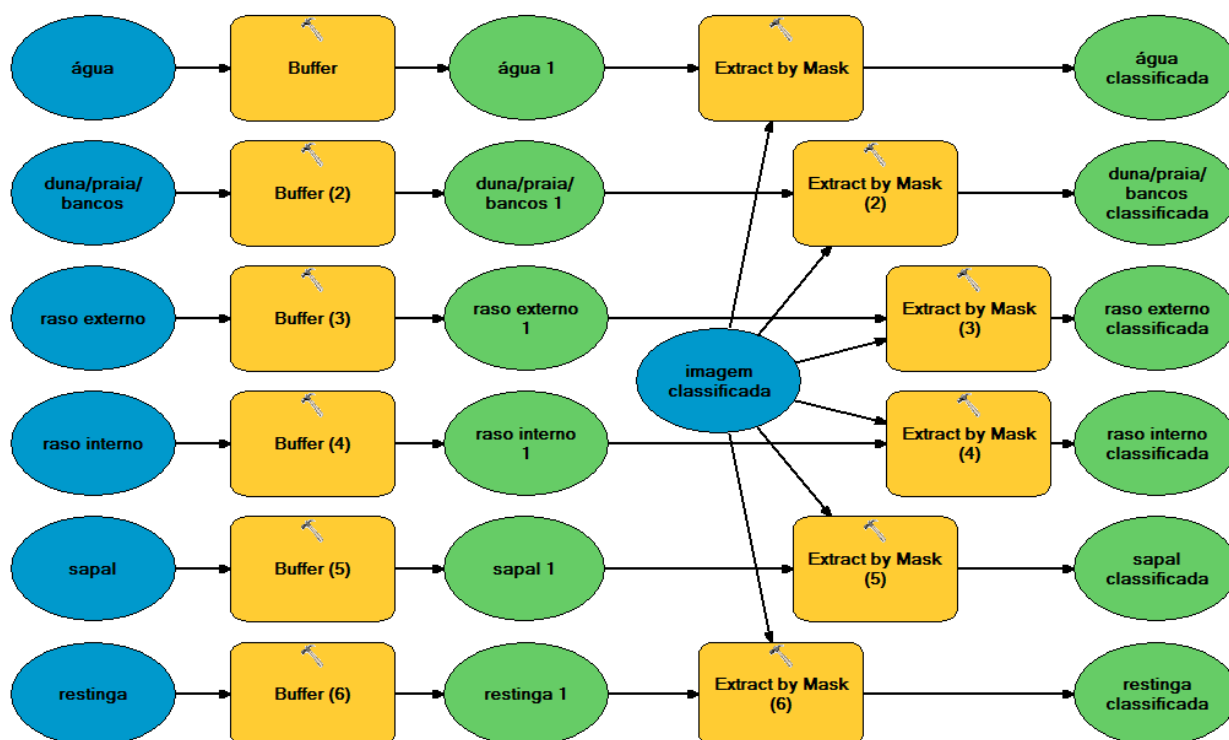


Figura 5.20. Modelo criado para preparar as diferentes classes para a contagem dos píxeis na determinação da precisão da classificação, com a classe “restinga” a representar a classe “vegetação dunar/transição/artificial”.

Analisando a **Tabela 5.2** percebe-se que, para um total de 5025 píxeis (somatório dos totais fotointerpretados, a verde, ou dos totais classificados, a amarelo), 4316 foram bem classificados (somatório da diagonal), o que representa 86 % de píxeis corretamente classificados (divisão dos primeiros pelos segundos), sendo esta a precisão global da classificação. Percebe-se, também, que a precisão do utilizador (*ground truth*) é mais baixa nas classes “raso externo” (0,76) e “raso interno” (0,75), e que a precisão do produtor (classificador) é muito baixa (0,54) na classe “raso externo” (apresentando quase metade dos pontos classificados como “água” ou “raso interno”) e baixa na classe “duna, praia, bancos” (0,72). A classe “água” apresenta a melhor precisão do produtor (0,95) e a classe “vegetação dunar/transição/artificial” apresenta a melhor precisão do utilizador (0,97).

Foi determinado o índice k (kappa), utilizando-se a **Equação 2.1**, chegando-se ao resultado 0,82, podendo esta ser considerada, de acordo com Montserud e Leamans (1992, Cit. por Mather, 2004, p246), uma muito boa estimativa (superior a 0,75) na precisão da classificação relativamente ao *ground truth* considerado neste estudo.

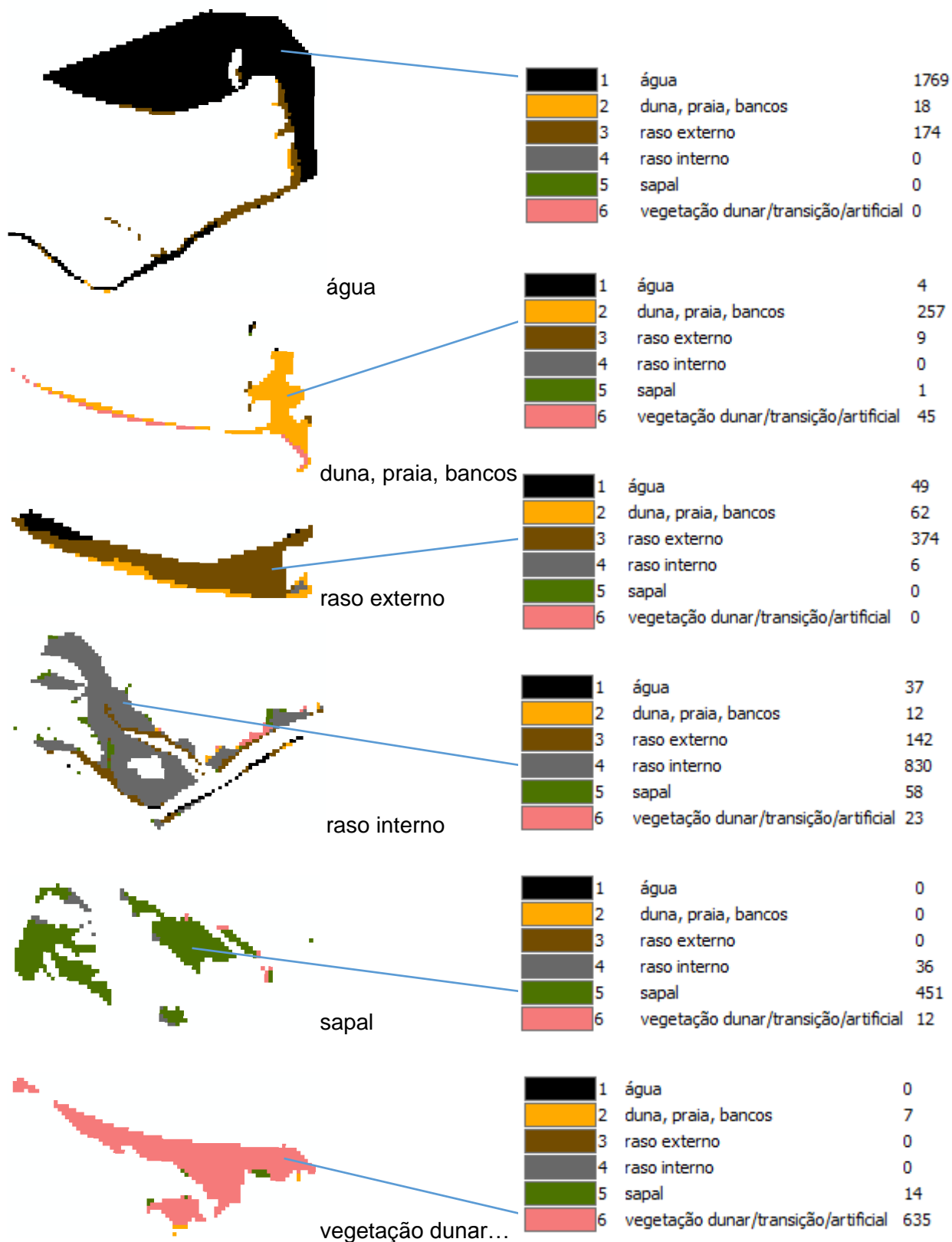


Figura 5.21. Classificações individuais resultantes da aplicação das máscaras de corte definidas pelo ground truth e contagem de píxeis para cada classe.

Tabela 5.2. Matriz de confusão para avaliar a precisão do método de classificação.

		classificados (máxima verosimilhança)						totais foto-interpretados	precisão do utilizador
		água	duna, praia, bancos	raso externo	raso interno	sapal	vegetação dunar/ transição/ artificial		
ground truth	água	1769	18	174	0	0	0	1961	0.90
	duna, praia, bancos	4	257	9	0	1	45	316	0.81
	raso externo	49	62	374	6	0	0	491	0.76
	raso interno	37	12	142	830	58	23	1102	0.75
	sapal	0	0	0	36	451	12	499	0.90
	vegetação dunar/ transição/artificial	0	7	0	0	14	635	656	0.97
totais classificados		1859	356	699	872	524	715	4316	5025
precisão do produtor		0.95	0.72	0.54	0.95	0.86	0.89		0.86

5.2 ESTUÁRIO DO TEJO

Após validação dos modelos utilizados para a zona de teste (Restinga do Alfeite e estruturas morfológicas circundantes), foi alargada a área de estudo à totalidade do estuário interior do Tejo, tentando manter-se a maioria das classes previamente definidas. A maior extensão e o diferente comportamento nas classificações obrigaram, no entanto, a algumas modificações. Foram mantidas as classes correspondentes a formações arenosas (praias, restingas, dunas e bancos de areia) e a sapais, mas houve necessidade de fundir as duas classes de rasos de maré (raso externo e raso interno) em apenas uma (rasos de maré). A classe mais heterogénea, correspondente a vegetação dunar e zonas de transição e artificiais, passou a incluir também as salinas que se desenvolvem nas zonas marginais do estuário, que não existiam na zona de teste. Surgem também aqui alguns bancos de ostras, que foram incluídos na classe de rasos de maré, por se associarem a eles e por se encontrarem em pequenas manchas com pouco significado no contexto geral do estuário, em parte dependentes do nível da maré no momento de aquisição da imagem.

5.2.1 Área de estudo

Pretendeu-se, nesta fase do trabalho, aplicar os critérios utilizados na área de teste à totalidade das margens do estuário, havendo a necessidade de criar uma máscara de corte para as imagens de satélite que abrangesse a totalidade dos elementos morfo-sedimentares em estudo, excluindo os elementos fora do seu âmbito.

Como limite terrestre, optou-se pela linha da máxima preia-mar de águas vivas equinociais (LMPMAVE), definida, basicamente, como o limite do leito marinho e demais águas sujeitas à influência das marés. No Projeto MorFeed (PTDC/AAC-AMB/100092/2008, num consórcio entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil e a Fundação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa), foi criada uma linha com base não só em critérios altimétricos, mas também na presença de biocenoses e em cartografia antiga (Rilo et al., 2014). Esta foi a linha designada oficialmente pela Agência Portuguesa do Ambiente para delimitar o leito do estuário, através de um protocolo de colaboração com o referido projeto, integrado na elaboração do Plano de Ordenamento do Estuário do Tejo (POE Tejo).

Para o estudo evolutivo das margens, considerou-se importante incluir uma área maior, para além da definida pela LMPMAVE criada no POE Tejo, que abrangesse a totalidade dos elementos morfológicos considerados neste estudo, mas apenas na margem sul do estuário (por ser a que se apresenta menos antropizada). Manteve-se, na margem norte, o limite da área de estudo na LMPMAVE e excluiu-se a embocadura do estuário, pela rara presença, nestas zonas, de elementos morfológicos interessantes para o estudo.

Foi assim criado um polígono para efeitos de máscara de corte das imagens de satélite, em que se excluiu a embocadura e em que a margem norte é coincidente com a LMPMAVE e a margem sul coincidente com esta linha acrescida de 50 metros na direção da orla (ajustada manualmente para cumprir os critérios utilizados na zona de teste, incluindo-se desta forma os elementos morfo-sedimentares relevantes). A **Figura 5.22** mostra um exemplo da diferença entre a LMPMAVE definida no projeto MorFeed para o Estuário do Tejo (a vermelho) e a linha de “buffer” de 50 metros adaptada manualmente para a margem sul (a verde).

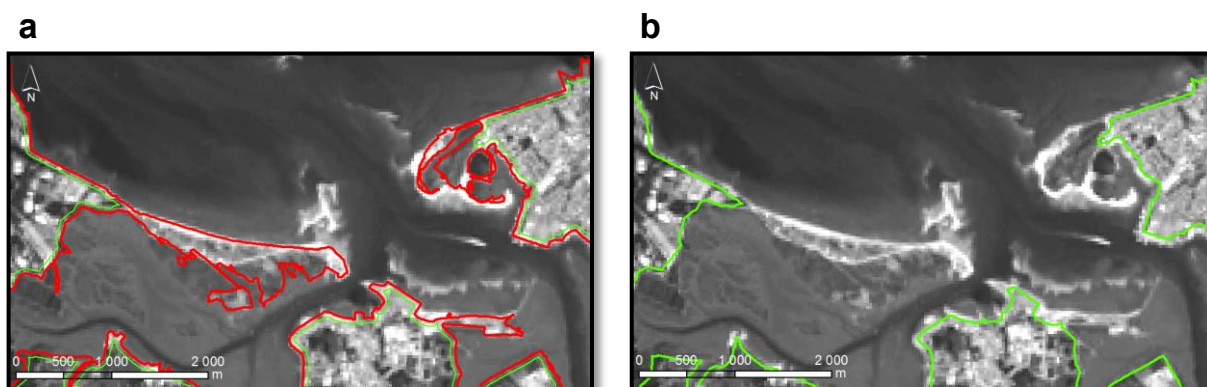


Figura 5.22. Exemplo de edição dos limites para a área de estudo: **(a)** a vermelho, a LMPMAVE, que excluiria algumas das estruturas importantes neste estudo; **(b)** a verde, o limite após aplicação do buffer de 50 metros e ajuste manual.

5.2.2 Imagens

Para o presente estudo foram seleccionadas, de acordo com os critérios referidos e com a disponibilidade de imagens para a zona de estudo, as imagens Landsat das séries 1, 5, 7 (SLC-on e SLC-off) e 8, listadas na **Tabela 5.3**. O intervalo temporal que foi possível reunir situa-se entre 1978 e 2014, com os intervalos aproximados entre imagens referidos em meses, variando entre 5 e 88 (as cores das células nesta coluna e nas três colunas seguintes da **Tabela 5.3** representam quantidades, dando uma ideia imediata das variações de cada parâmetro em diferentes imagens). Foi possível reunir quase uma imagem por ano entre os anos 2000 e 2014, tendo havido dificuldade na obtenção de imagens para as décadas anteriores, que apresentavam alturas de maré muito elevadas, ou nebulosidade muito acentuada. A hora de aquisição é muito semelhante em todas as imagens (entre as 10:22 e as 11:16, consoante o satélite utilizado), resultando aproximadamente no mesmo ângulo de incidência da luz (apesar das diferenças nas estações do ano). As alturas de maré, estimadas a partir das constituintes calculadas através da análise harmónica da série maregráfica de Cascais entre 2008 e 2014, utilizando o programa UTide (Codiga, 2011), variam entre 0,79 e 1,91 m ZH (entre -1,29 e -0,17 m NMM), ou seja, apresentam diferenças até 1,12 m para diferentes imagens.

A resolução espacial é de 30 metros para todas as imagens escolhidas (à exceção da imagem de 1978, com resolução espacial de 60 metros) e todos os procedimentos foram realizados em *software* Esri ArcMap 10.1TM, no sistema de coordenadas WGS84 UTM Zone 29N.

Tabela 5.3. Imagens seleccionadas e respetivas características.

Referência	Satélite	Sensor	Data	Intervalo (meses)	Hora	maré ZH (Cascais)	NMM
LC82040332014302LGN00	Landsat 8	OLI/TIRS	29-10-2014	12	11:15	1.18	-0.90
LC82040332013283LGN00	Landsat 8	OLI/TIRS	10-10-2013		11:16	1.12	-0.96
LE72040332012145ASN00	Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	24-05-2012	16	11:09	1.07	-1.01
LE72040332010123ASN00	Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	03-05-2010	25	11:07	1.37	-0.71
LE72040332009264ASN00	Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	21-09-2009	7	11:05	1.00	-1.08
LE72040332008278EDC00	Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	04-10-2008	12	11:03	1.26	-0.82
LE72040332007243EDC00	Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	31-08-2007	13	11:04	0.79	-1.29
LE72040332005237EDC00	Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	25-08-2005	24	11:04	1.35	-0.73
LE72040332004203EDC01	Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	21-07-2004	13	11:03	1.11	-0.97
LT52040332003256MTI01	Landsat 5	TM	13-09-2003	11	10:52	1.09	-0.99
L71204033_03320020427	Landsat 7 (SLC-on)	ETM+	27-04-2002	17	11:03	1.68	-0.40
LE72040332001098EDC00	Landsat 7 (SLC-on)	ETM+	08-04-2001	13	11:05	1.60	-0.48
LE72040332000320AGS00	Landsat 7 (SLC-on)	ETM+	15-11-2000	5	11:05	0.81	-1.27
L5204000_00019970726	Landsat 5	TM	26-07-1997	39	10:45	1.91	-0.17
L5204000_00019910811	Landsat 5	TM	11-08-1991	71	10:38	1.04	-1.04
LT52040331984108XXX01	Landsat 5	TM	17-04-1984	88	10:42	0.86	-1.22
M2220033_03319781101	Landsat 1	MSS	01-11-1978	65	10:22	1.38	-0.70

5.2.3 Pré-processamento

As bandas espectrais escolhidas para a análise da totalidade do estuário são as mesmas que foram utilizadas na área piloto, pelos mesmos motivos referidos anteriormente. Todas as imagens foram inicialmente cortadas pela linha já descrita, que consiste na exclusão do canal de embocadura, com a LMPMAVE a delimitar a margem norte e a mesma linha acrescida de 50 m a delimitar a margem sul, seguidas da composição das quatro bandas escolhidas, de acordo com o modelo esquematizado na **Figura 5.23**.

Para as imagens Landsat 7 com a avaria SLC-off o pré-processamento incluiu, da mesma forma que para a área de teste, a remoção das zonas afetadas pela avaria do sistema, seguindo os procedimentos esquematizados no modelo da **Figura 5.24**. Uma exceção a esta regra foi a imagem SLC-off de 2012, que foi tratada como SLC-on e pré-processada de acordo com a **Figura 5.23**, por não ter incluídos, no conjunto de imagens, os ficheiros Gap-Mask. No entanto, as linhas resultantes da avaria não afetam a zona de estudo para este levantamento (**Figura 5.25**), não havendo a necessidade de remover as linhas afetadas.

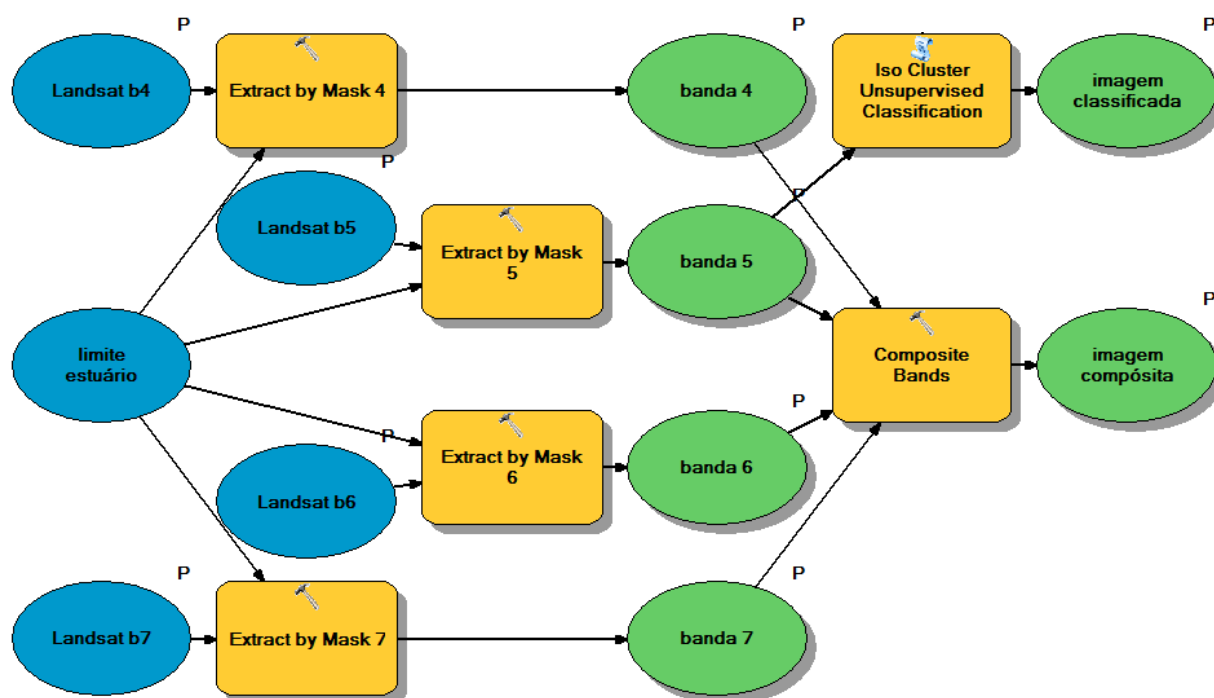


Figura 5.23. Modelo de pré-processamento inicial para o corte das imagens OLI (bandas 4567).

Foi tentada, em algumas imagens, uma normalização radiométrica simples, com o intuito de reduzir possíveis diferenças resultantes de variações no ângulo de incidência da luz solar, da dispersão atmosférica ou da presença de nebulosidade. A partir dos valores mínimo e máximo dos níveis de cinzento de cada imagem foi feito um “stretch” linear, de forma a abranger todo o intervalo de números digitais (ou seja, de 0 a 255 no caso das imagens TM e ETM+), utilizando-se a função *Raster Calculator* com a expressão da **Equação 5.1**.

$$y = 255 [x - \min(x)] / [\max(x) - \min(x)] \quad (\text{Equação 5.1})$$

A **Figura 5.26** mostra a banda 3 da imagem TM (Landsat 5) de 1991, antes e após o “stretch”. Apesar de a segunda imagem surgir com maior contraste visual, nas classificações testadas em imagens com e sem “stretch” o resultado foi muito semelhante, não se justificando deste modo mais este passo no pré-processamento.

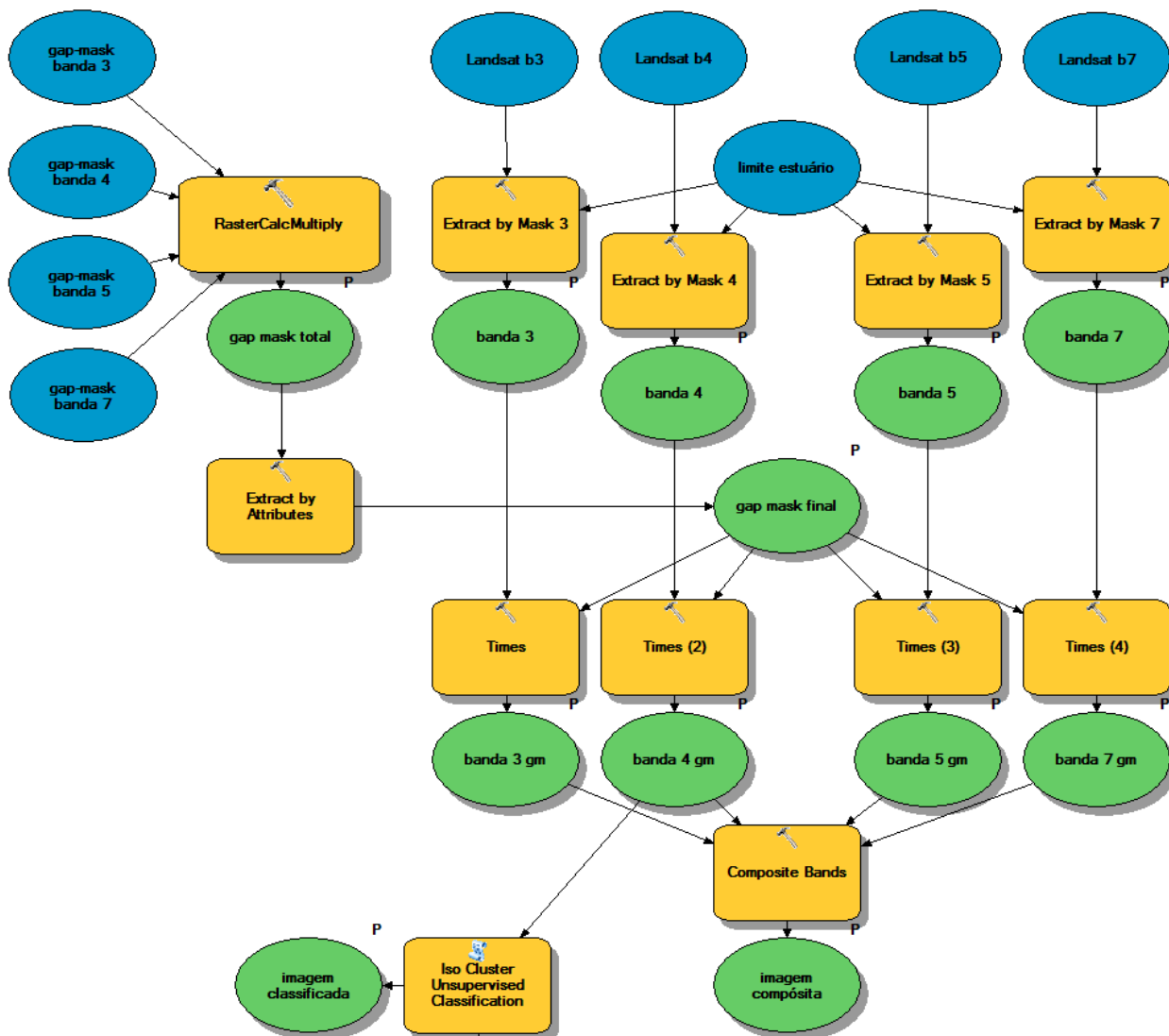


Figura 5.24. Modelo de pré-processamento para corte das imagens ETM+ SLC-off pelo limite do estuário, com exclusão das linhas de erro, seguido da classificação inicial para excluir a área imersa e pela composição das imagens.

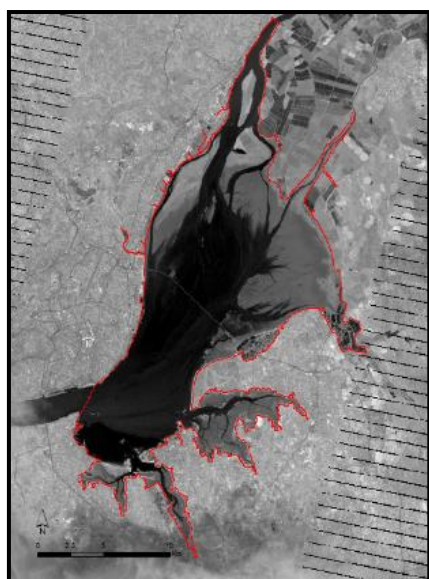


Figura 5.25. Imagem SLC-off de 2012 (banda 4).

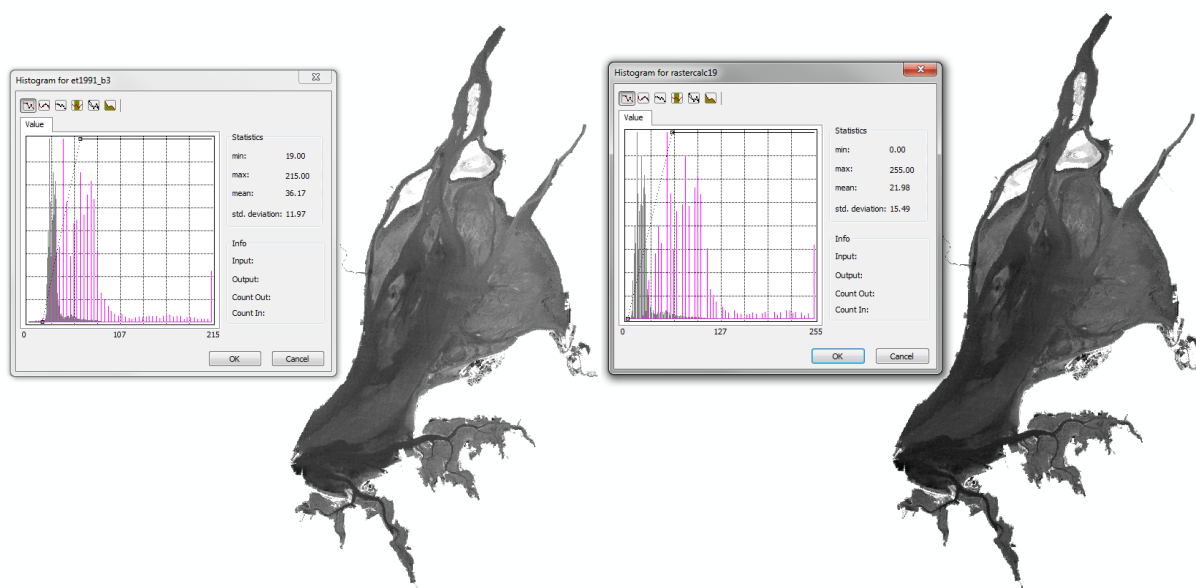


Figura 5.26. Aplicação de um “stretch” na imagem cortada da banda 3 de 1991.

A elevada turbidez das águas do estuário, combinada com extensões significativas de rastos de maré, podem tornar difícil a classificação das zonas imersas, confundindo inclusivamente o classificador nas zonas emersas, independentemente da combinação de bandas escolhida. Qualquer tentativa de classificação no leito do estuário será influenciada pelos níveis da energia hidrodinâmica verificados no momento da aquisição da imagem, uma vez que os valores de refletância em água turva são quase sempre superiores aos valores de refletância em águas limpas (**Figura 5.27**).

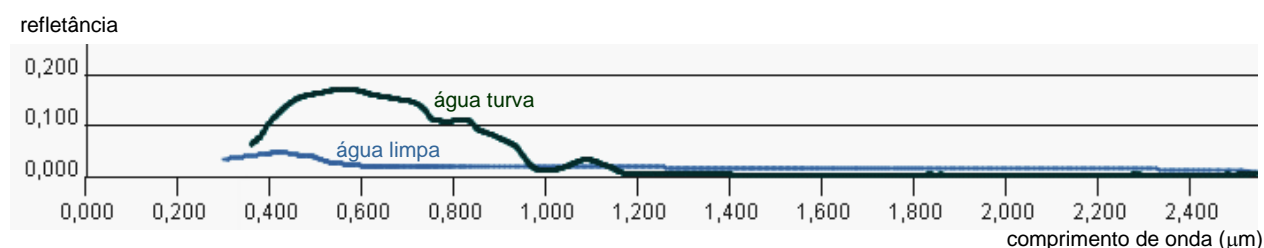


Figura 5.27. Refletâncias da água limpa a azul claro e da água turva a verde escuro (USGS Spectral Viewer, In: USGS, 2014).

Para simplificar o processo de classificação, foi excluída a área inundada do leito, utilizando-se para isso um método de classificação não assistida sobre a banda do infravermelho próximo (banda 4 nas imagens MSS, TM e ETM+ e banda 5 nas imagens OLI), que apresenta forte contraste entre zonas imersas e zonas emersas. Para esta classificação foi escolhido o método *Iso Cluster Unsupervised Classification* do programa ArcMap10.1™, com 10 classes

(passo incluído no modelo da **Figura 5.23**), seguida de uma avaliação visual para determinação das classes correspondentes à área inundada (**Figura 5.28.b**). No exemplo apresentado, as classes 2 a 5 correspondem nitidamente a zonas inundadas, sendo as restantes classes as zonas emersas no momento de aquisição da imagem. Uma reclassificação dividiu a imagem em duas classes, uma designada por “imersa” e outra por “emersa”, sendo apenas a última utilizada como máscara, após um filtro generalização (Majority Filter com 8 vizinhos e *half replacement threshold*, usado três vezes) e conversão para polígonos (**Figura 5.28-c**). A máscara foi aplicada à imagem compósita com as bandas OLI 4, 5, 6 e 7 de 2013, como polígonos de corte, utilizando o modelo esquematizado na **Figura 5.29**, que usa as duas imagens resultantes do processo anteriormente descrito (imagem classificada e imagem compósita resultantes do modelo esquematizado na **Figura 5.24**).

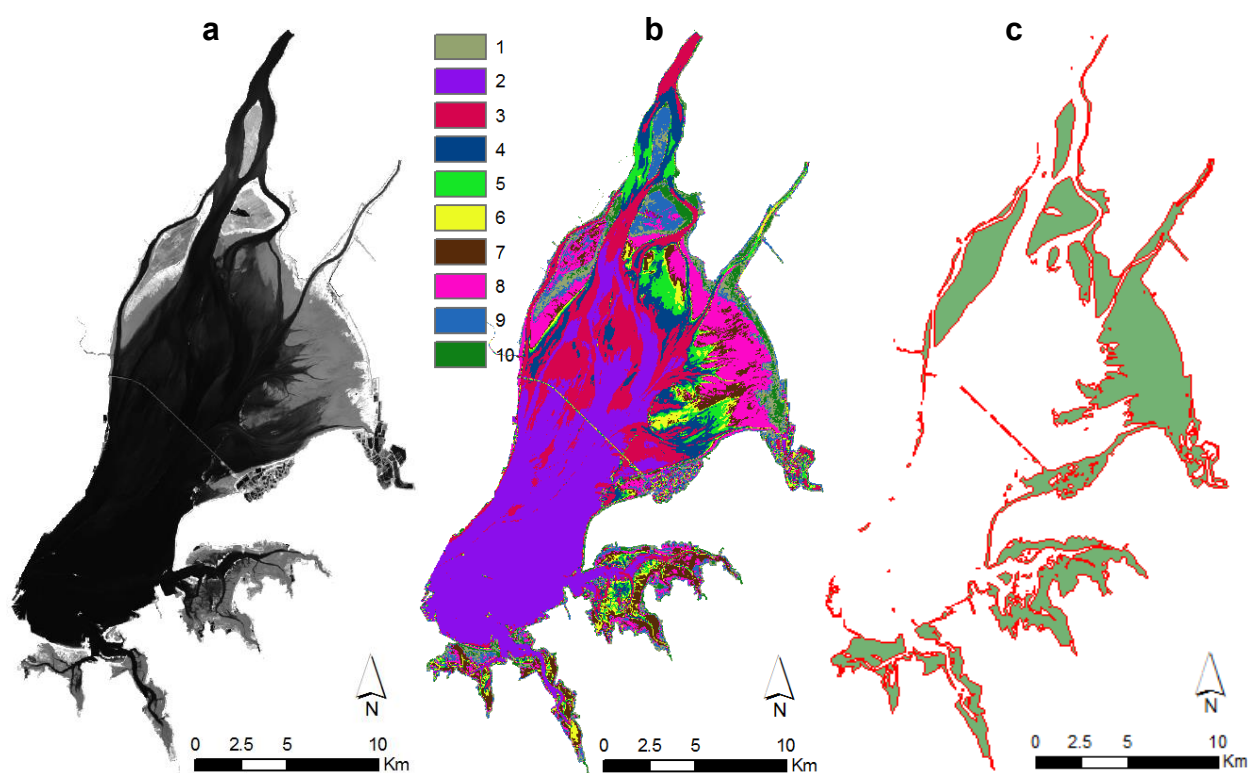


Figura 5.28. Imagem OLI de 2013 (banda 5), classificada de modo não assistido, para retirar as zonas inundadas e criar duas classes: emersa e imersa. **(a)** imagem original; **(b)** imagem classificada; **(c)** polígonos emersos resultantes.

O processo foi repetido para todas as imagens, com algumas diferenças, consoante o tipo de sensor: na composição das imagens OLI foram utilizadas as bandas 4, 5, 6 e 7, nas TM e ETM+ foram utilizadas as bandas 3, 4, 5 e 7 e na MSS de 1978 a combinação que melhor funcionou para a classificação foi a das bandas 5, 6, 7 e 4, de acordo com a **Tabela 5.4**.

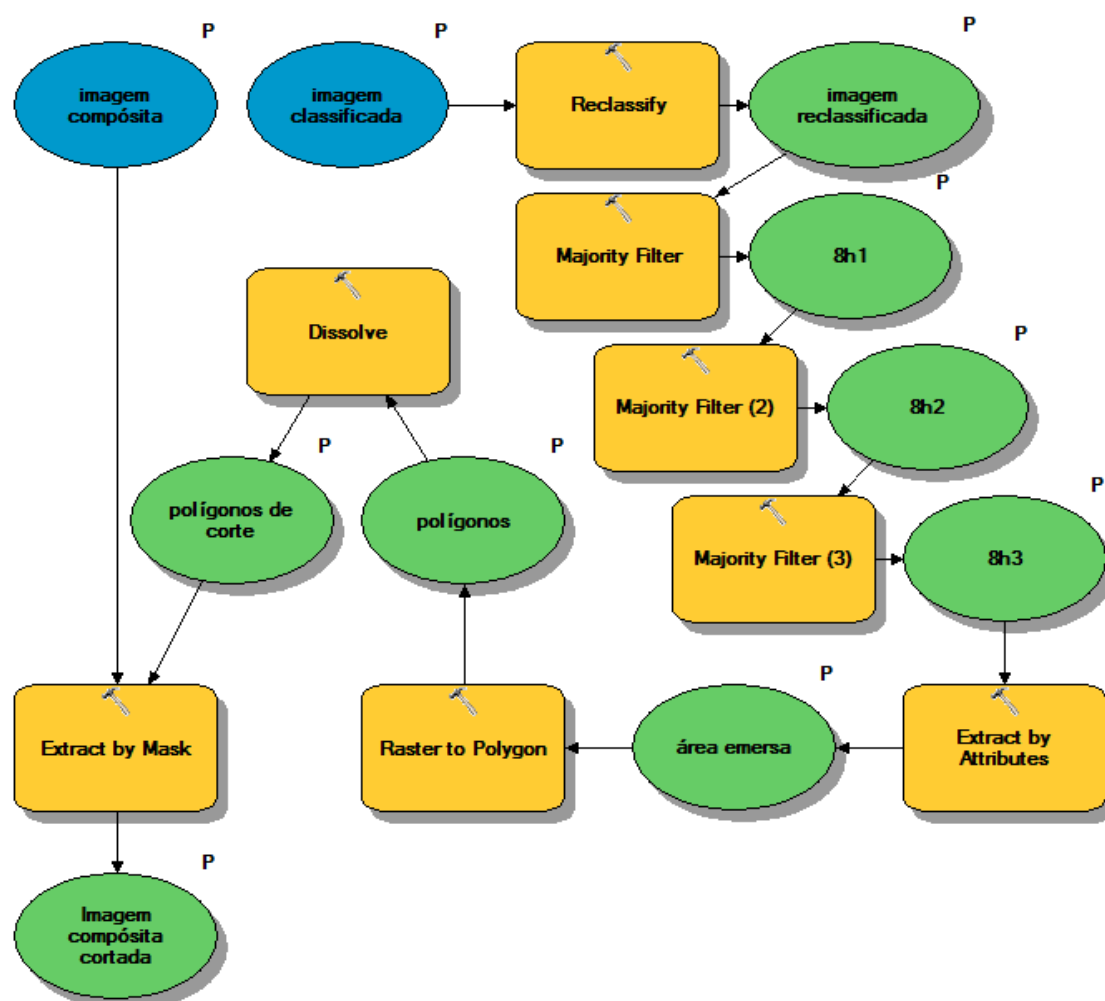


Figura 5.29. Modelo de pré-processamento para excluir as zonas imersas.

Tabela 5.4. Bandas utilizadas na composição das imagens.

Satélite	Sensor	Ano	Imagem compósita
Landsat 8	OLI/TIRS	2014	4567
Landsat 8	OLI/TIRS	2013	4567
Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	2012	3457
Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	2010	3457
Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	2009	3457
Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	2008	3457
Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	2007	3457
Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	2005	3457
Landsat 7 (SLC-off)	ETM+	2004	3457
Landsat 5	TM	2003	3457
Landsat 7 (SLC-on)	ETM+	2002	3457
Landsat 7 (SLC-on)	ETM+	2001	3457
Landsat 7 (SLC-on)	ETM+	2000	3457
Landsat 5	TM	1997	3457
Landsat 5	TM	1991	3457
Landsat 5	TM	1984	3457
Landsat 1	MSS	1978	5674

5.2.4 Processamento e pós-processamento

Para a fase de classificação em todo o estuário foi criado um ficheiro de amostras de treino para cada data (**Figura 5.30.a**), com apenas quatro classes: “raso de maré” (correspondente à fusão das duas classes utilizadas para a zona piloto, “raso de maré externo e canais principais” e “raso de maré interno” e incluindo os bancos de ostras); “areia” (correspondente à classe “duna, praia e banco arenoso”); “sapal”; e “outros” (este último correspondente à classe “vegetação dunar/ transição/ artificial”, acrescida das salinas). A classificação foi realizada utilizando a imagem compósita cortada resultante do modelo da **Figura 5.29**, recorrendo ao método assistido de máxima verosimilhança utilizado para a zona de teste (modelo da **Figura 5.18**), obtendo-se uma imagem final classificada (**Figura 5.30.b**). O procedimento foi seguidamente repetido para as restantes datas. Os resultados destas classificações apresentam-se no **Anexo 2**.

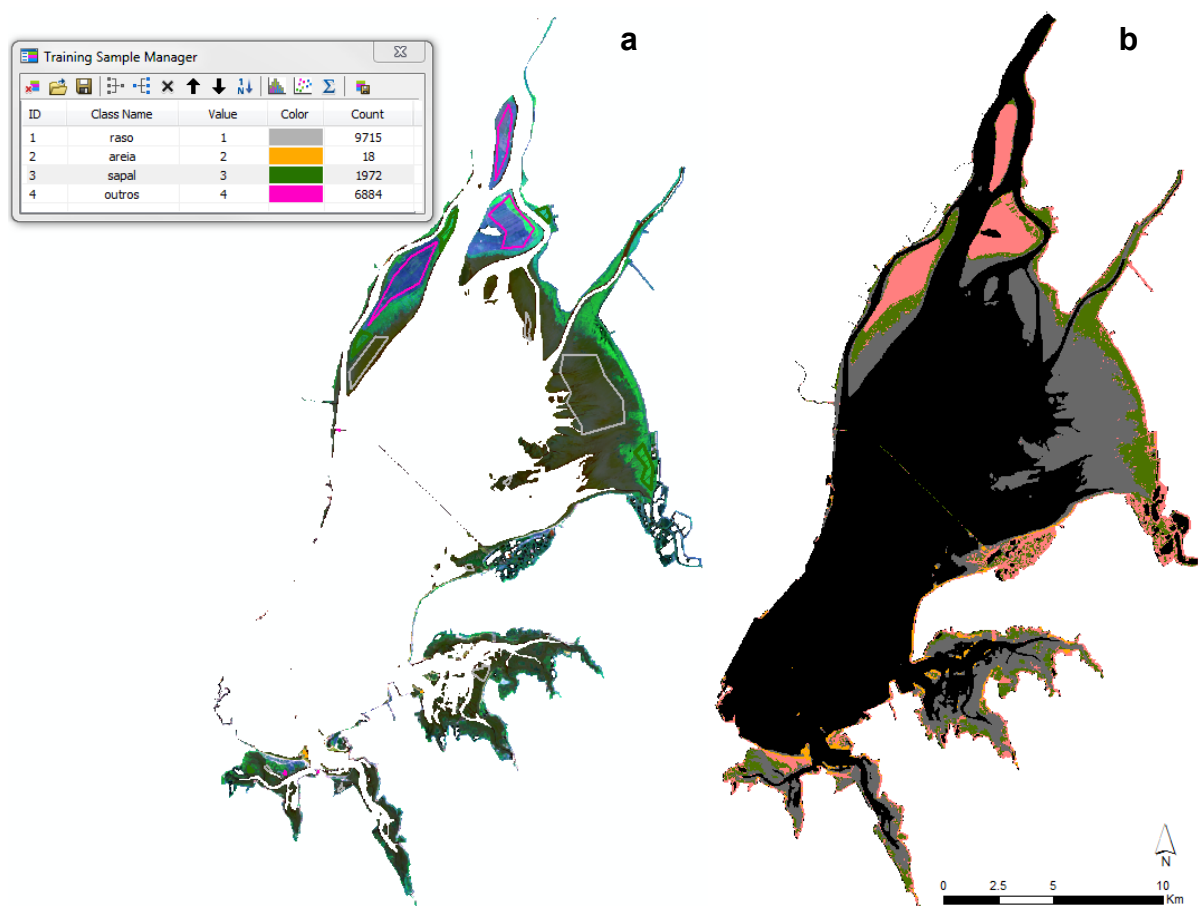


Figura 5.30. (a) Imagem compósita de 2013 com as amostras de treino para a zona emersa do estuário; (b) imagem classificada generalizada do mesmo ano, com fundo de cor preta na zona imersa.

6. RESULTADOS

Os resultados deste trabalho apresentam-se, tal como acontece no capítulo da metodologia, divididos em duas fases principais, correspondentes às duas zonas estudadas: a área de teste, a Restinga do Alfeite e o estuário interior do Tejo, ao qual se expandiu a análise inicial.

6.1 RESTINGA DO ALFEITE

Para a área de teste os modelos descritos na metodologia foram inicialmente aplicados nas imagens Landsat de 2013, sendo em seguida repetidos os procedimentos para as imagens de 2007, de 2001 e de 1991. Na **Figura 6.1** apresentam-se as imagens compósitas para cada um dos quatro anos analisados, às quais se sobrepõem os respetivos ficheiros de assinatura. Na **Figura 6.2** apresentam-se as imagens classificadas, após aplicação do modelo de pós-processamento (filtro generalização *Majority Filter*).

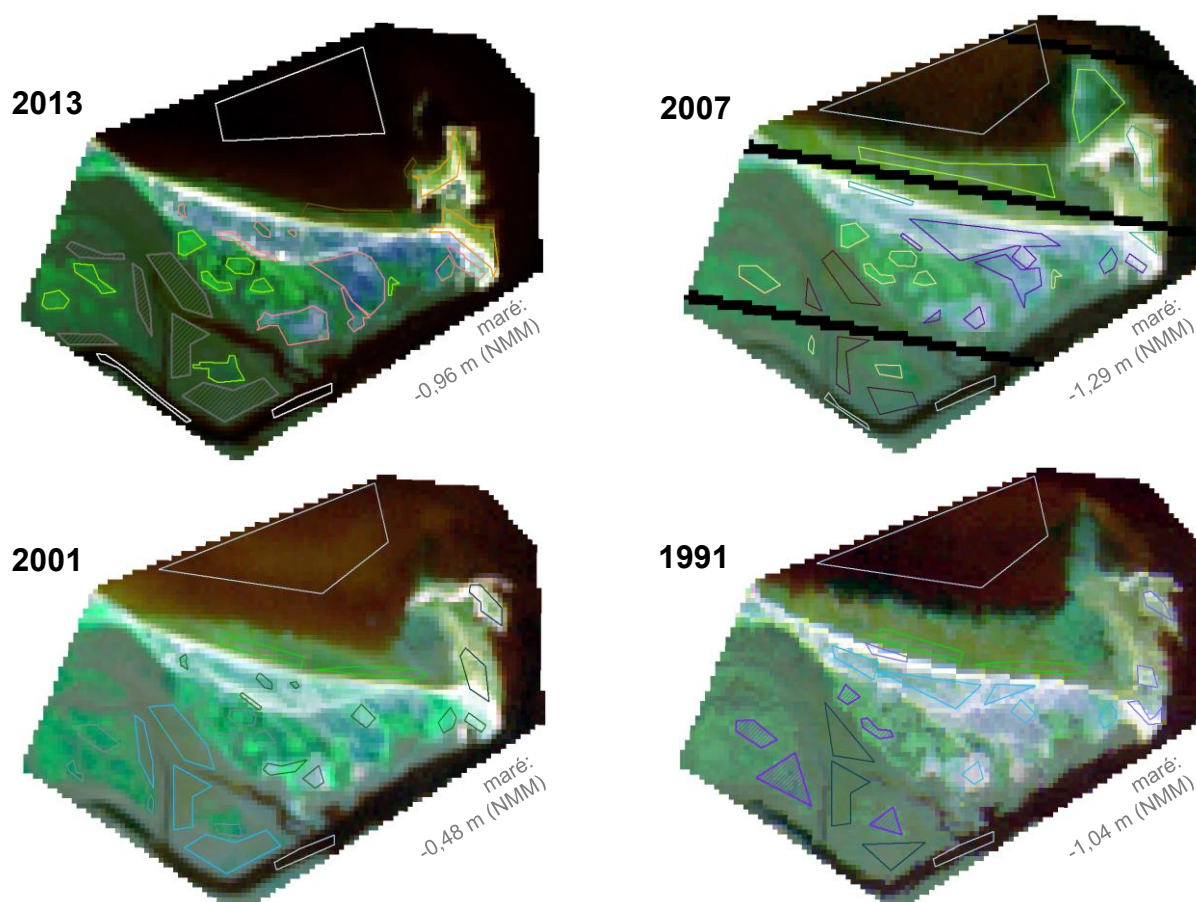


Figura 6.1. Ficheiros de assinatura sobrepostos às imagens compósitas dos anos 2013, 2007, 2001 e 1991.

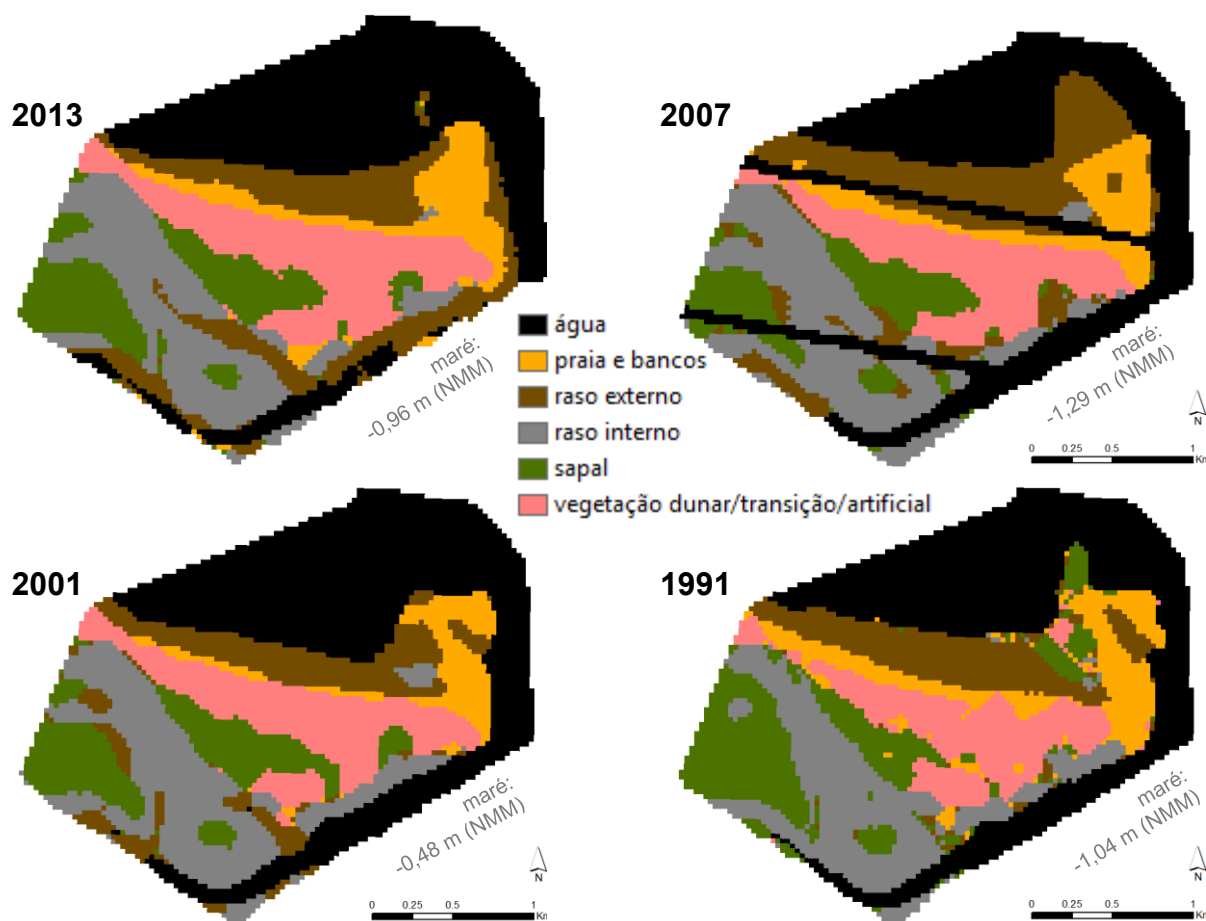


Figura 6.2. Imagens classificadas generalizadas em formato matricial para os anos 2013, 2007, 2001 e 1991.

A contagem dos píxeis realizou-se da mesma forma já descrita para a avaliação da precisão da classificação e permitiu quantificar as áreas ocupadas por cada classe ao longo do intervalo estudado, com os resultados apresentados na **Tabela 6.1**. Para avaliar a segurança da utilização do filtro generalização *Majority Filter*, esta tabela mostra os resultados antes e após a aplicação do filtro, não se verificando diferenças significativas (além de uma ligeira redução no número total de píxeis em cada imagem), podendo considerar-se segura a utilização deste filtro em estudos quantitativos (as correlações entre as colunas do mesmo ano, antes e após a generalização, variam entre 0,983 e 0,997).

Os gráficos da **Figura 6.3** mostram as diferentes proporções de cada classe, após aplicação do filtro generalização, para cada ano analisado, seguidas da comparação de cada uma das classes ao longo dos quatro anos analisados, com dados retirados da **Tabela 6.1**.

Tabela 6.1. Proporções de áreas ocupadas pelas diferentes classes, antes e após aplicação do filtro generalização.

antes da generalização	2013		2007		2001		1991	
	pixels	%	pixels	%	pixels	%	pixels	%
água	2089	33.2	2040	32.4	2274	36.1	1935	30.7
duna, praia e bancos	548	8.7	485	7.7	415	6.6	695	11.0
raso externo	965	15.3	1279	20.3	1040	16.5	812	12.9
raso interno	996	15.8	1034	16.4	1012	16.1	1001	15.9
sapal	809	12.8	699	11.1	731	11.6	1092	17.3
vegetação dunar/transição/artificial	892	14.2	762	12.1	827	13.1	764	12.1
Totais	6299	100	6299	100	6299	100	6299	100

após generalização	2013		2007		2001		1991	
	pixels	%	pixels	%	pixels	%	pixels	%
água	2079	33.8	2174	35.0	2357	38.0	2073	33.3
duna, praia e bancos	500	8.1	467	7.5	375	6.0	625	10.0
raso externo	938	15.2	1092	17.6	786	12.7	677	10.9
raso interno	1014	16.5	1109	17.8	1116	18.0	1077	17.3
sapal	714	11.6	577	9.3	717	11.6	976	15.7
vegetação dunar/ transição/artificial	910	14.8	798	12.8	855	13.8	793	12.7
Totais	6155	100	6217	100	6206	100	6221	100

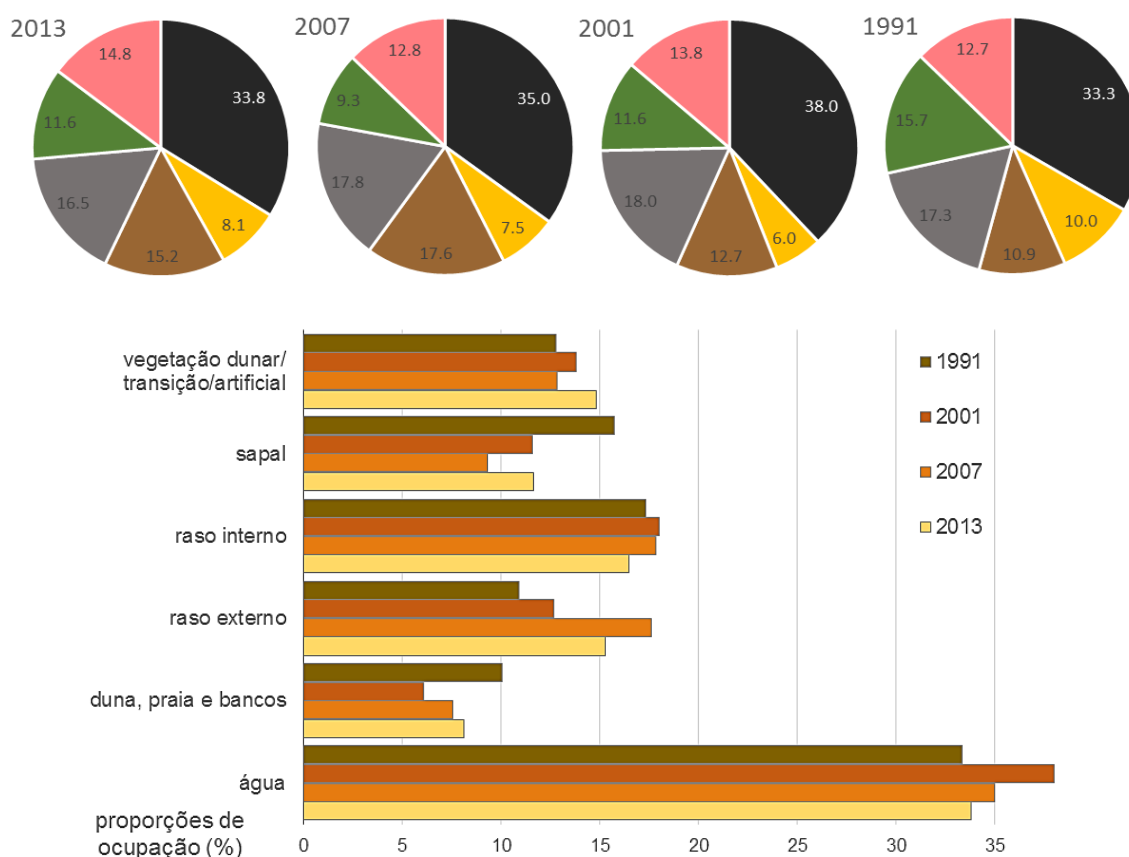


Figura 6.3. Proporções de ocupação das diferentes classes em 1991, 2001, 2007 e 2013, após aplicação do filtro generalização.

Uma das zonas cuja evolução se reveste de maior interesse, e onde as diferenças são mais notórias ao longo do tempo, é a zona a norte da restinga, constituída pela praia e pelos bancos arenosos enraizados na sua extremidade. Para analisar a evolução dos contornos destas estruturas, foi isolada e vetorizada a classe “duna, praia e banco arenoso” nas quatro imagens Landsat classificadas de acordo com os métodos criados neste trabalho. Foi também isolada a mesma classe vetorizada a partir do “Plano Hydrographico do Porto de Lisboa”, referente a levantamentos de 1845-1847. Estes polígonos e o vetorizado a partir das fotografias aéreas de 1955-1958 foram sobrepostos entre si, para comparação da evolução em termos de forma e posição do conjunto das estruturas analisadas (**Figura 6.4**).

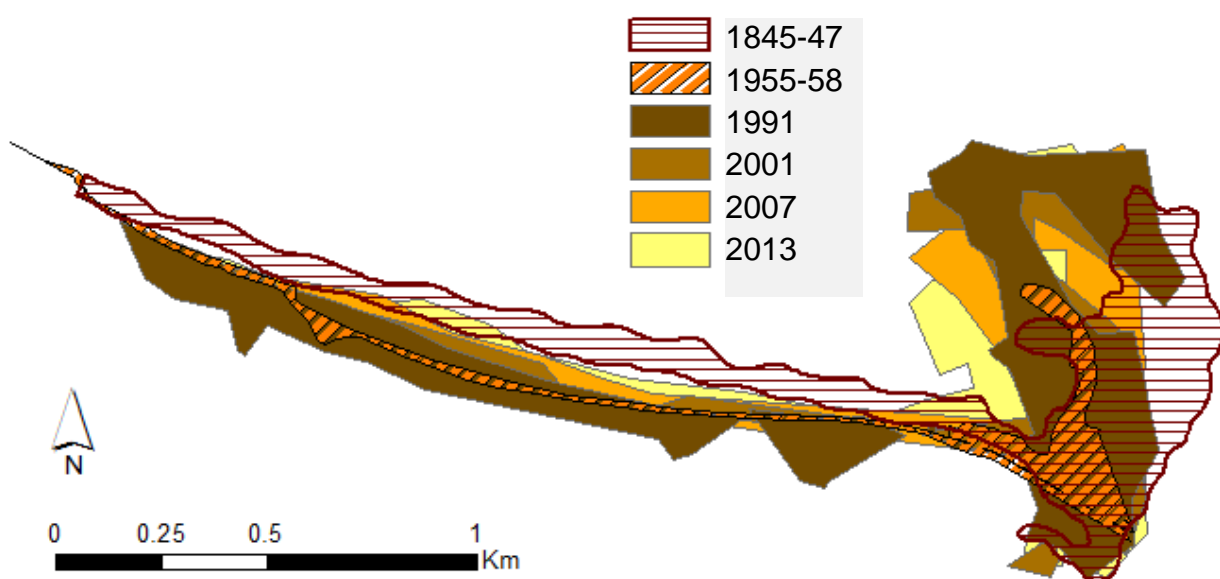


Figura 6.4. Sobreposição da classe “duna, praia e banco arenoso” em diferentes datas, desde 1845-47 até 2013.

Os mesmos polígonos foram sobrepostos individualmente à imagem compósita OLI 432 (correspondente a cor verdadeira) de 2013, que serviu de referência neste trabalho, para comparação de cada contorno com a forma atual (**Figura 6.5**). A tabela e o gráfico da figura mostram a quantificação das diferentes áreas, à qual foi acrescentada a informação das marés.

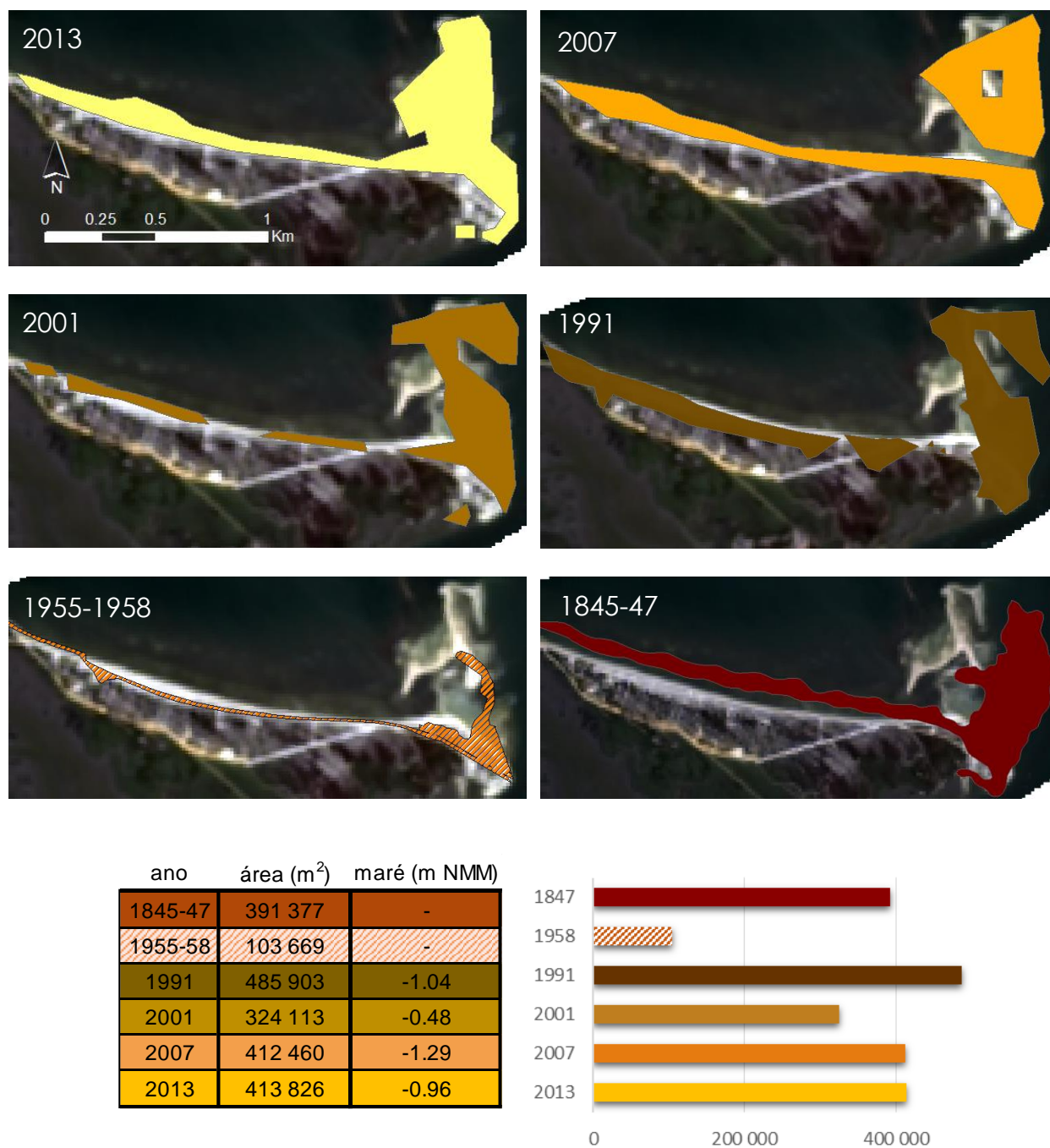


Figura 6.5. Polígonos da classe “duna, praia e banco arenoso” de várias datas sobrepostos à imagem compósita de 2013 (bandas OLI 432 - cor verdadeira) e quantificação das áreas respetivas.

6.2 ESTUÁRIO DO TEJO

A aplicação dos modelos à totalidade do estuário revelou-se mais difícil do que para a área de teste, pela maior complexidade do sistema, com maior diversidade de padrões e refletâncias, tendo-se simplificado as classes relativamente às definidas para a área de teste.

Para iniciar a classificação na totalidade do estuário utilizou-se a mesma imagem de referência de 2013 da área de teste (LC82040332013283LGN00), com os procedimentos de pré-processamento esquematizados nos modelos representados nas **Figura 5.23** e **5.24**, consoante se tratassem de imagens sem ou com avaria no sistema SLC, respetivamente. A remoção da área submersa seguiu os procedimentos da **Figura 5.29** e os processos de classificação e generalização foram realizados de acordo com o modelo da **Figura 5.18**.

O processo foi repetido para todos os anos analisados, apresentando-se no **Anexo 2** todas as imagens classificadas, antes e após generalização, assim como as imagens compósitas e os polígonos de treino que lhes deram origem. Associada a cada classificação, foi listada em tabela a quantidade de píxeis e a percentagem de cada classe, assim como as proporções em gráfico circular, para cada ano (**Figura 6.6**).

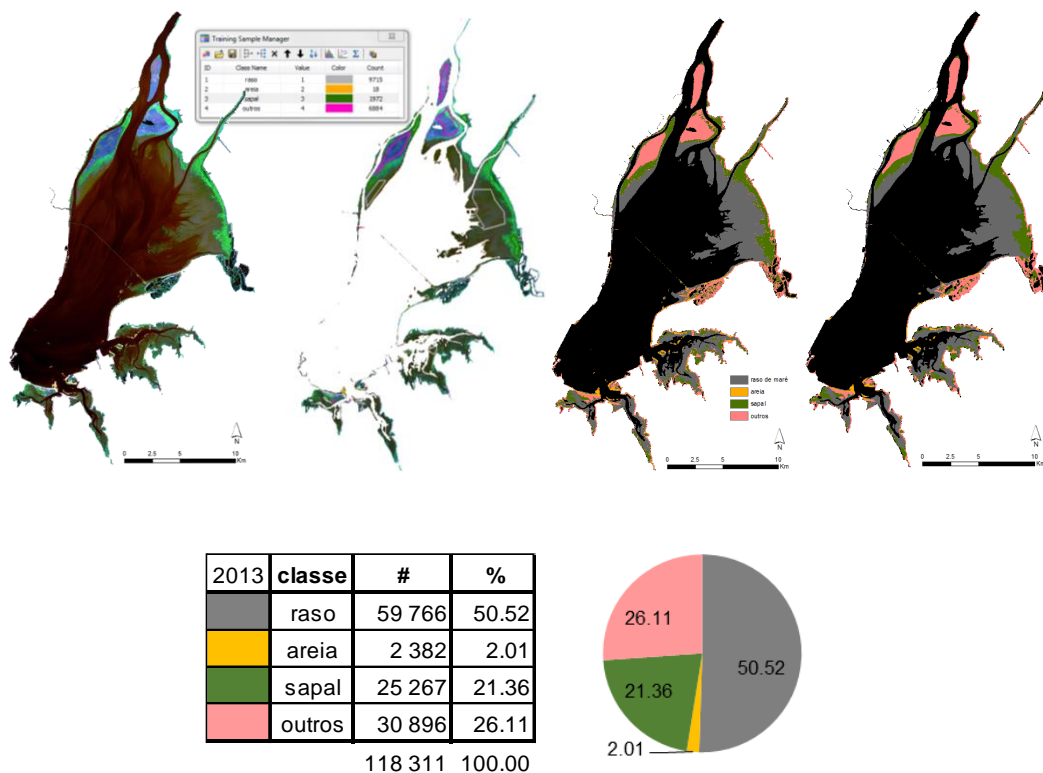


Figura 6.6. Imagem compósita 2013, zona emersa com os polígonos de treino, imagem classificada, imagem classificada generalizada e respetiva quantificação.

No final foi compilada toda a informação quantitativa numa única tabela, com informação visual colorida para dar uma ideia imediata das proporções entre datas (**Tabela 6.2**). Os valores de 1978 estão multiplicados por 4, para conversão da resolução espacial (a imagem de 1978 tem píxeis aproximadamente quadrados com 60 m em vez de 30 m de lado), que se reflete na menor quantidade de píxeis representados.

Tabela 6.2.

Resultados quantitativos de ocupação para todas as datas analisadas, em percentagens (%) e número de píxeis (#).

ano	#	marés		raso		areia		sapal		outros	
		ZH	NMM	%	#	%	#	%	#	%	#
2014	122 401	1.18	-0.90	48.50	59365	2.27	2779	29.98	36701	19.24	23556
2013	118 311	1.12	-0.96	50.52	59766	2.01	2382	21.36	25267	26.11	30896
2012	135 516	1.07	-1.01	55.92	75777	2.58	3490	24.90	33739	16.61	22510
2010	135 991	1.37	-0.71	58.47	79515	1.86	2528	22.19	30178	17.48	23770
2009	163 178	1.00	-1.08	63.87	104227	1.76	2871	16.77	27372	17.59	28708
2008	139 934	1.26	-0.82	55.02	76985	1.81	2537	24.58	34394	18.59	26018
2007	152 784	0.79	-1.29	60.89	93035	2.18	3325	20.91	31942	16.02	24482
2005	113 887	1.35	-0.73	47.67	54293	0.86	982	28.88	32894	22.58	25718
2004	155835	1.11	-0.97	65.05	101367	4.42	6883	13.37	20841	17.16	26744
2003	168 485	1.09	-0.99	64.31	108361	3.49	5887	14.96	25197	17.24	29040
2002	138608	1.68	-0.40	53.25	73813	3.56	4928	25.56	35432	17.63	24435
2001	155618	1.60	-0.48	55.31	86066	4.83	7509	25.70	39996	14.17	22047
2000	160581	0.81	-1.27	63.52	102003	3.79	6090	15.69	25191	17.00	27297
1997	66956	1.91	-0.17	11.65	7800	11.06	7406	41.84	28015	35.45	23735
1991	165366	1.04	-1.04	62.11	102702	3.44	5681	20.26	33511	14.19	23472
1984	186082	0.86	-1.22	67.28	125204	1.40	2603	17.28	32164	14.03	26111
1978	147856	1.38	-0.70	64.83	95860	3.32	4916	17.26	25520	14.58	21560

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO

O capítulo de análise e discussão deste trabalho apresenta-se, tal como acontece nos dois capítulos anteriores, dividido em duas fases principais, correspondentes às duas zonas estudadas: a área de teste (Restinga do Alfeite) e o Estuário do Tejo.

7.1 RESTINGA DO ALFEITE

A imagem OLI Landsat de 2013 (com referência LC82040332013283LGN00), escolhida inicialmente para definir o método de trabalho para os objetivos propostos, apresenta qualidade superior às restantes imagens utilizadas (à exceção da mais recente, de 2014), possuindo menos ruído, maior resolução radiométrica e maior quantização. A combinação das bandas OLI 4, 5, 6 e 7, cobrindo desde a cor vermelha visível (banda 4) aos infravermelhos próximos (banda 5) e médios (bandas 6 e 7), permitiu distinguir melhor os diferentes elementos (classes) entre si do que as imagens uni-banda individuais, ou a combinação de cor verdadeira (4, 3, 2, representada na **Figura 7.1.a**), ou qualquer outra combinação de bandas testada.

A aplicação do método à zona dos bancos de areia revelou-se bastante satisfatória, apresentando homogeneidade suficiente nos valores de refletância dos píxeis respetivos e contraste suficiente relativamente à classe envolvente predominante (a água). Embora visualmente não pareça existir diferença evidente entre a cobertura de água e a de raso de maré externo mais distante (parcialmente submerso), o classificador conseguiu distinguir esta classe da classe dos bancos de areia adjacentes, de forma bastante compatível com o levantamento topográfico efetuado em 19/03/2014 (**Figura 7.1**) e com a fotointerpretação das imagens Google Earth™ mais recentes.

A aplicação do filtro generalização não afetou de forma significativa a classificação (**Tabela 6.1**), dando aliás alguma consistência aos resultados obtidos, pela eliminação dos píxeis isolados pertencentes a outras classes (**Figura 7.1.d** e **Figura 7.2.c**).

O mesmo método aplicado às imagens ETM+ (de 2007 e 2001) e TM (1991) revelou-se menos satisfatório, possivelmente devido às diferenças radiométricas e de quantização referidas. A necessidade de construir diferentes ficheiros de assinatura para cada uma das datas tornou o processo mais moroso do que o previsto, impedindo a repetição do método em todas as datas inicialmente propostas para esta fase do trabalho.

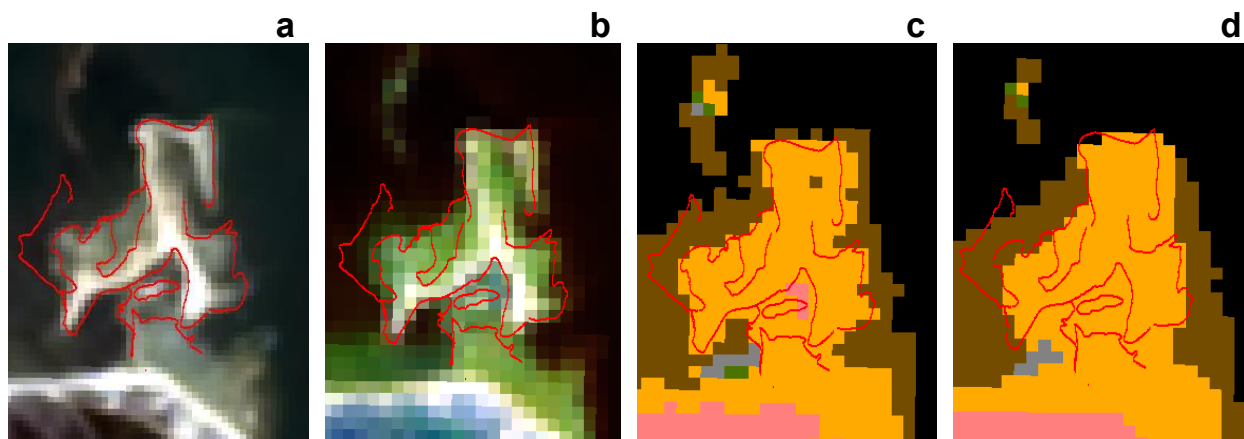


Figura 7.1. Zona dos bancos arenosos com o levantamento DGPS sobreposto às imagens: **(a)** compósita 432 de 2013 (com filtro Pan-sharpening); **(b)** compósita 4567 de 2013; **(c)** classificada de 2013; **(d)** classificada de 2013 com triplo filtro generalização (Majority Filter).

Nas imagens classificadas de 2007 e 1991 (**Figura 6.2**) o raso de maré externo apresenta maior extensão do que nas imagens de 2013 e 2001, essencialmente devido à menor altura de maré no momento de aquisição das imagens (o nível de maré em 2007 está cerca de 30 cm abaixo do de 2013 e cerca de 80 cm abaixo do de 2001), suficiente para uma grande diferença em área, numa estrutura de tão fraco declive. A imagem de 1991 apresenta as maiores diferenças de classificação relativamente às restantes, com a presença de grande quantidade de píxeis isolados, mesmo após a tripla generalização que foi aplicada a todas as imagens, aparentando maior heterogeneidade de classes (**Figura 7.2**).

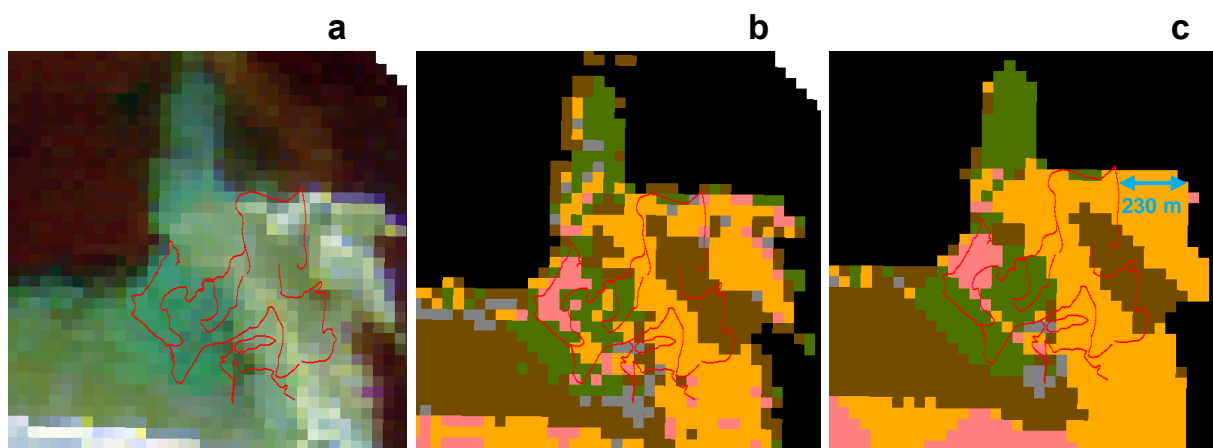


Figura 7.2. Zona dos bancos arenosos com o levantamento topográfico de 2014 sobreposto às imagens: **(a)** compósita 3457 de 1991; **(b)** classificada de 1991; **(c)** classificada de 1991 com triplo filtro generalização.

Na imagem classificada de 1991, as manchas classificadas como sapal na zona contígua aos bancos de areia a norte da restinga não correspondem a sapal (é uma zona demasiado energética do ponto de vista hidrodinâmico), sendo possivelmente resultantes da presença dos bancos de ostras que povoaram vários pontos do estuário até há algumas décadas atrás (e que deixaram bastantes vestígios ao longo de todo o estuário), que nas imagens compósitas se apresentam em tons de verde, levando o classificador a atribuir-lhe erradamente a classe “sapal”. Na mesma imagem, a sobreposição do levantamento topográfico de 2014 mostra um grande afastamento entre os bancos de areia nas duas datas, com um deslocamento de cerca de 230 m na zona nordeste dos bancos em quase 23 anos, correspondente a uma média de 10 m por ano, assumindo um movimento aproximadamente uniforme (**Figura 7.2.c**).

Uma análise visual qualitativa à principal mancha de sapal, na zona ocidental da área de teste (**Figura 6.2**), sugere uma redução na sua extensão entre 1991 e 2001, mas o formato e as dimensões mantêm-se ao longo das restantes imagens, o que parece sugerir um diferente critério de classificação nas zonas exteriores desta mancha na imagem de 1991 (possivelmente pela ausência de polígonos de teste na zona de fronteira entre o sapal e o raso interno neste local, nesta data, que forçariam a classificação). Esta análise revela a importância que deve ser atribuída à fase de delimitação destes polígonos, que será determinante na classificação final.

Em termos quantitativos, analisando os dados da **Tabela 6.1** e os gráficos da **Figura 6.3**, é possível verificar algumas diferenças nas proporções entre classes nas quatro datas estudadas (1991, 2001, 2007 e 2013):

- Há um pico na classe “água” em 2001, que pode explicar-se pela menor área de raso areno-vasoso devido à maior altura de maré neste levantamento; 2007 apresenta maior proporção de água, apesar de estar em maré mais baixa que as restantes imagens, possivelmente devido à presença das bandas resultantes da avaria no sistema SLC, que no processo de generalização se fundem na classe “água”;
- Há um pico na classe “duna, praia e banco arenoso” em 1991, que pode explicar-se pela elevada dispersão de pontos desta classe na zona interior da restinga, que não aparecem nos outros levantamentos (por terem sido excluídos no processo de generalização) e pela classificação errada da extremidade da restinga, antropizada, por ter refletância muito elevada, semelhante à da classe constituída essencialmente por areias lavadas;
- Há um pico na classe “raso externo” em 2007, explicado pela menor altura de maré nesta imagem, visível principalmente na zona a norte dos bancos arenosos; a imagem de 1991 apresenta déficit desta classe, não só pela classificação dos bancos de ostras como “sapal” em vez de “raso externo”, mas também pela ausência (pelo erro já referido na classificação) desta classe nos canais interiores da Baía do Seixal;

- O raso interno é a classe que se apresenta mais estável nas diferentes imagens, variando as suas proporções entre 16,5 e 18 %;
- Há um pico na classe “sapal” em 1991, devido à referida presença dos bancos de ostras na extremidade dos bancos arenosos, erradamente classificados como “sapal”, e à referida ausência de zonas de canais arenosos nos limites dos sapais.

A sobreposição dos polígonos resultantes da classe “duna, praia e banco arenoso” nas datas analisadas (**Figura 6.4**) salienta a nítida translação dos bancos arenosos para ocidente, com componente de rotação no sentido sinistrogiro, entre 1845-47 e 2013, movimentos descritos anteriormente por Amorim (2014) para o intervalo 1984-2013 (com recurso a técnicas de classificação não assistida, com a ferramenta *Iso Cluster Unsupervised Classification*). As quatro imagens Google Earth™ de 2002, 2004, 2007 e 2012 da **Figura 5.2** sugerem rotação sinistrogira e aparente perda de volume na zona norte dos bancos, também visível nas imagens da **Figura 6.2**, parecendo haver migração de material da zona mais distante do banco, a norte, para a zona do seu enraizamento, a sul, engrossando o corpo central. Este movimento poderá estar relacionado com o desmonte das ostreiras neste local ao longo das últimas décadas, que poderiam exercer alguma proteção à energia das ondas de geração local, evitando a erosão dos bancos arenosos. As correntes de vazante do rio Judeu serão, de acordo com Freire (2003), responsáveis pela migração destes bancos para oeste e as ondas do quadrante norte terão a função de transportar as areias em direção à restinga, havendo também uma componente de transporte longilitoral para leste (**Figura 7.3**), sendo a rotação dos bancos no sentido sinistrogiro um resultado do movimento combinado destes três fatores.

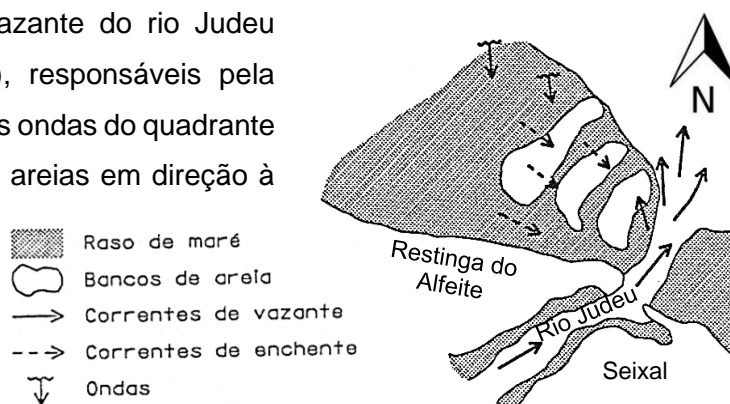


Figura 7.3. Esquema evolutivo da zona dos bancos arenosos a leste da Restinga do Alfeite (adaptado de Freire, 2003).

Excluindo da **Figura 6.4** o levantamento de 1845-47 (por ser menos rigoroso no posicionamento) é possível analisar a evolução da praia entre 1955-58 e 2013 (**Figura 7.4**). Independentemente das diferentes alturas de maré verificadas nestas cinco datas, pode observar-se, no extremo ocidental da restinga, estabilidade no limite entre a face de praia e o raso areno-vasoso a norte desta; na metade ocidental da praia há um avanço deste limite,

sugerindo também uma perda gradual da concavidade observada no levantamento fotográfico de 1958; a metade oriental da praia apresenta maior estabilidade ao longo deste intervalo. As variações na largura da praia nas imagens parecem dever-se, em grande parte, às diferenças de maré e às diferenças do critério do classificador, que por vezes inclui na classe “duna, praia e banco arenoso” algumas zonas não vegetadas de duna e noutras exclui estas zonas, sendo desta forma abusivo tirar conclusões em termos quantitativos para a largura da praia. A construção do Arsenal do Alfeite nas décadas de 1920 e 1930 poderá ter contribuído para o arqueamento inicial da praia e para um possível estreitamento durante as décadas seguintes, bloqueando o percurso habitual dos sedimentos que alimentavam anteriormente a praia através da deriva longilitoral. Esta análise poderá ajudar a compreender os regimes de correntes e de agitação locais para os intervalos estudados e inferir acerca da influência das construções vizinhas e do tráfego náutico adjacente.

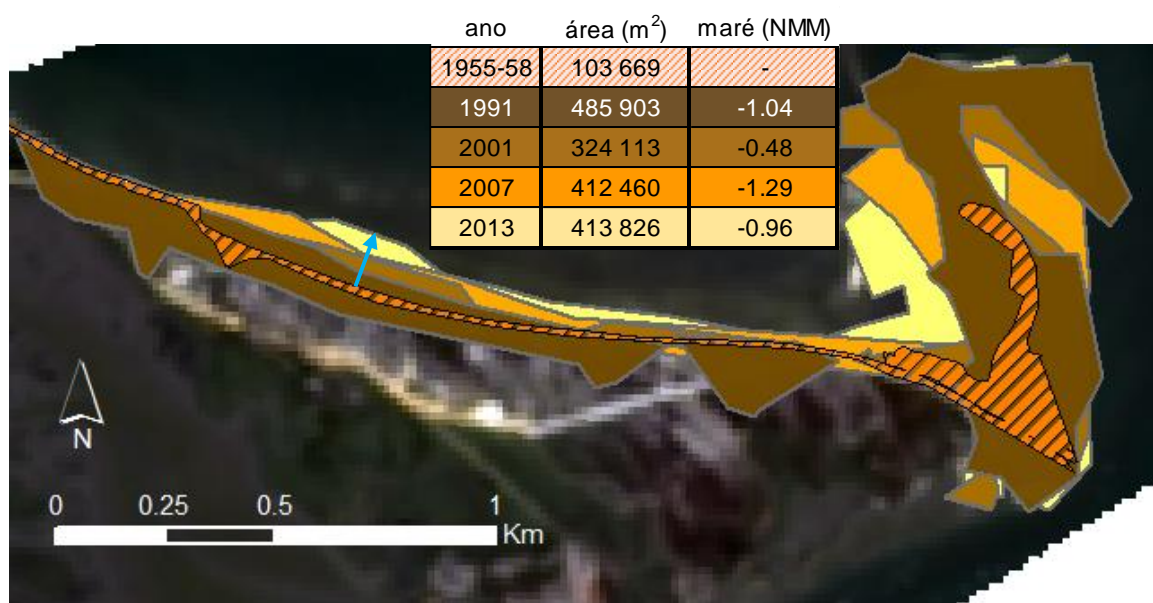


Figura 7.4. Sobreposição da classe “duna, praia e banco arenoso” em diferentes datas, sobre a imagem de cor verdadeira (OLI 432) de 2013, com indicação do movimento de avanço da concavidade da praia.

7.2 ESTUÁRIO DO TEJO

Com o objetivo de estimar visualmente a qualidade da classificação da imagem de 2013 de referência, foram selecionados alguns pontos da área de estudo, onde foi comparada a imagem classificada com imagens de maior resolução espacial (como as imagens Google Earth™ ou os ortofotomapas), de forma a identificar possíveis problemas. Para alguns tipos de

morfologias, semelhantes às existentes na zona de teste, a classificação revelou-se eficaz, coincidindo geralmente com a fotointerpretação no local. Um exemplo, representado na **Figura 7.5**, permite observar vários casos de sucesso na classificação, concordantes com o que se observa na imagem Google Earth™, nomeadamente as estruturas artificiais a nordeste (a rosa), os bancos de areia a norte (a amarelo), a praia a noroeste (junto ao cais fluvial do Seixal) e os rasos de maré em geral (a cinzento claro). De um modo geral, o filtro generalização tem tendência a melhorar a classificação, por eliminar os píxeis dispersos e descontextualizados, agregando os píxeis correspondentes à mesma classe.

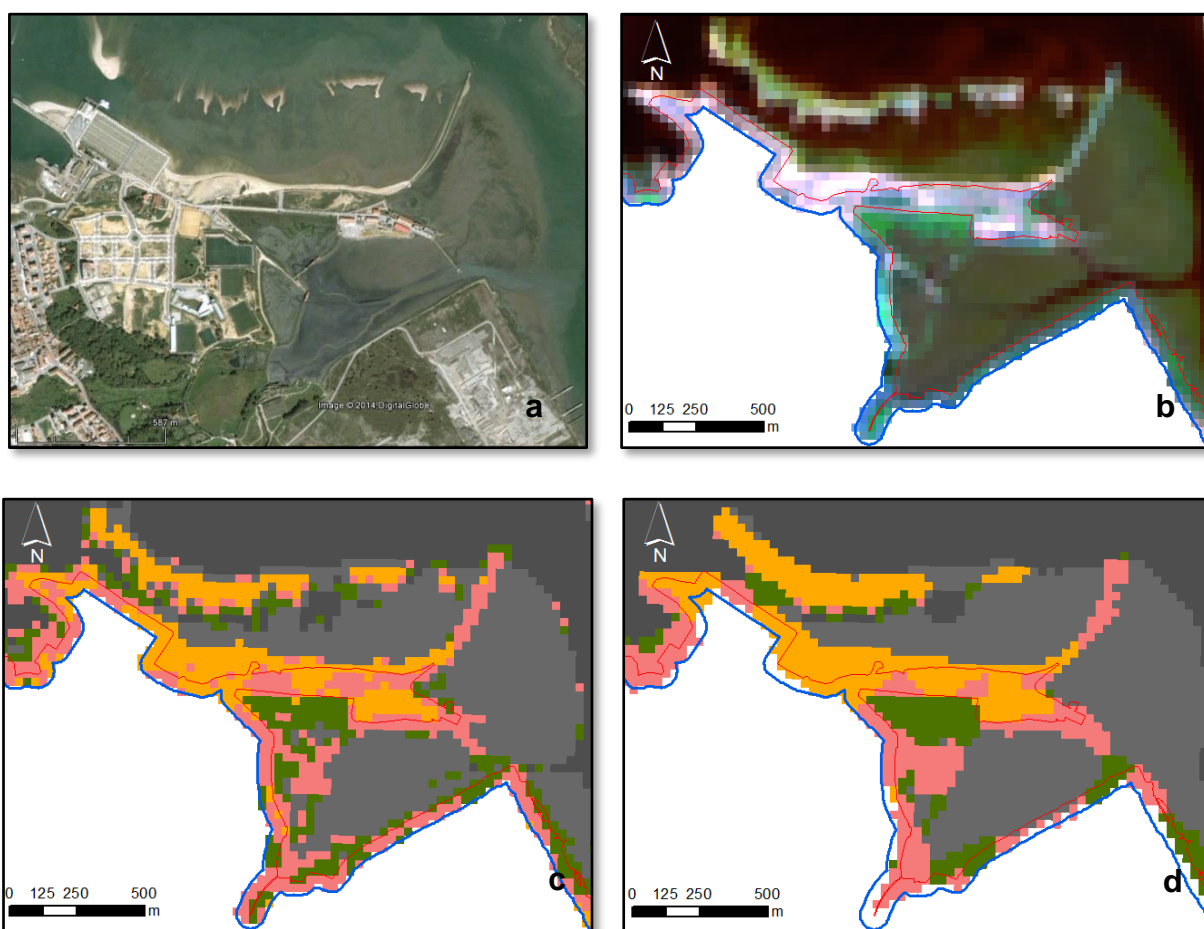


Figura 7.5. Pormenor da classificação na imagem de 2013, com indicação da LPMVAE (a vermelho) e da LPMVAE+50m (a azul): **(a)** imagem Google Earth™ de 11/03/2007; **(b)** imagem compósita Landsat 4567; **(c)** imagem classificada; **(d)** imagem classificada com 3 filtros generalização.

Em zonas de maior heterogeneidade o classificador tem tendência a confundir-se, atribuindo classes que não correspondem às fotointerpretadas, principalmente nas zonas marginais artificiais, mais complexas do que as naturais. Ocorrem com maior frequência na margem norte e na Ponte Vasco da Gama (que liga as zonas de Sacavém e Samouco),

apresentando estruturas artificiais por vezes classificadas como sapal ou areia (**Figura 7.6**). A classe areia surge por vezes associada à própria estrutura artificial (no caso de pontes, portos, marinas, etc.) que, por ter refletância muito elevada, é confundida pelo classificador, tal como a classe sapal, associada por vezes à sombra das estruturas, por apresentarem refletância mais baixa. Tal facto contribuiu para a decisão de utilizar a LMPMAVE para a margem norte do estuário, excluindo-se os 50 metros antropizados correspondentes a esta zona.

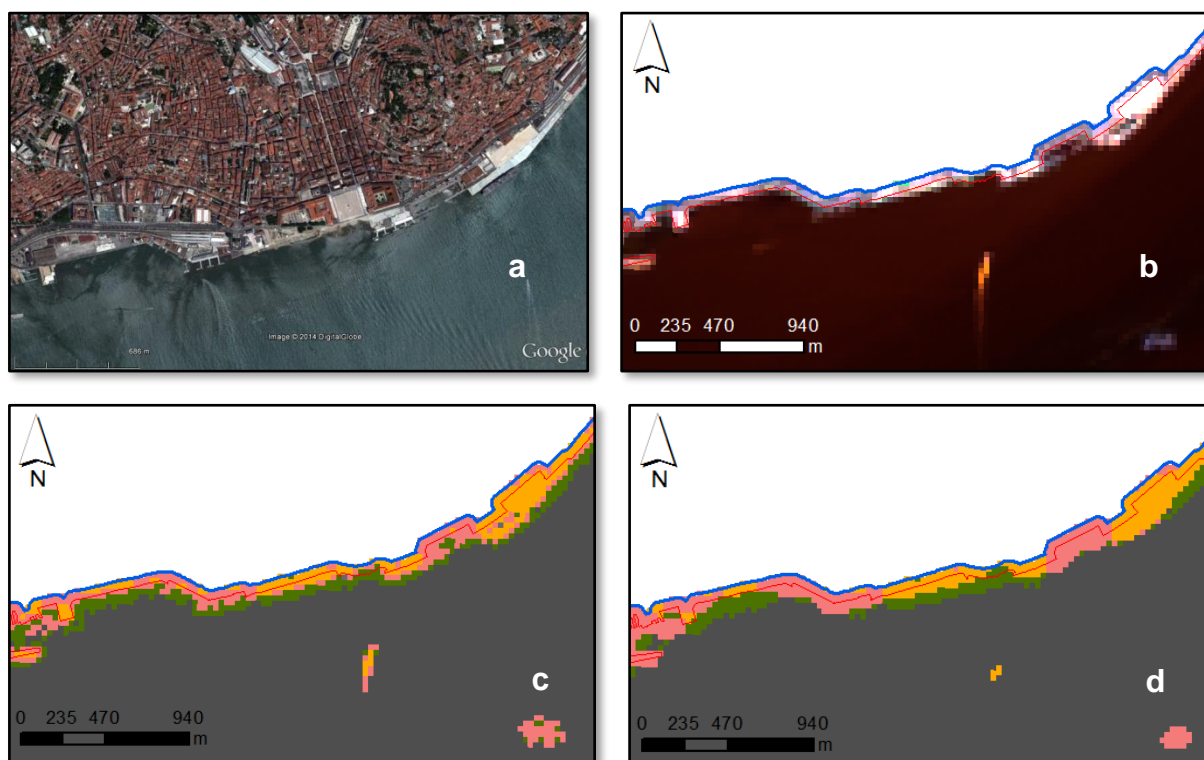
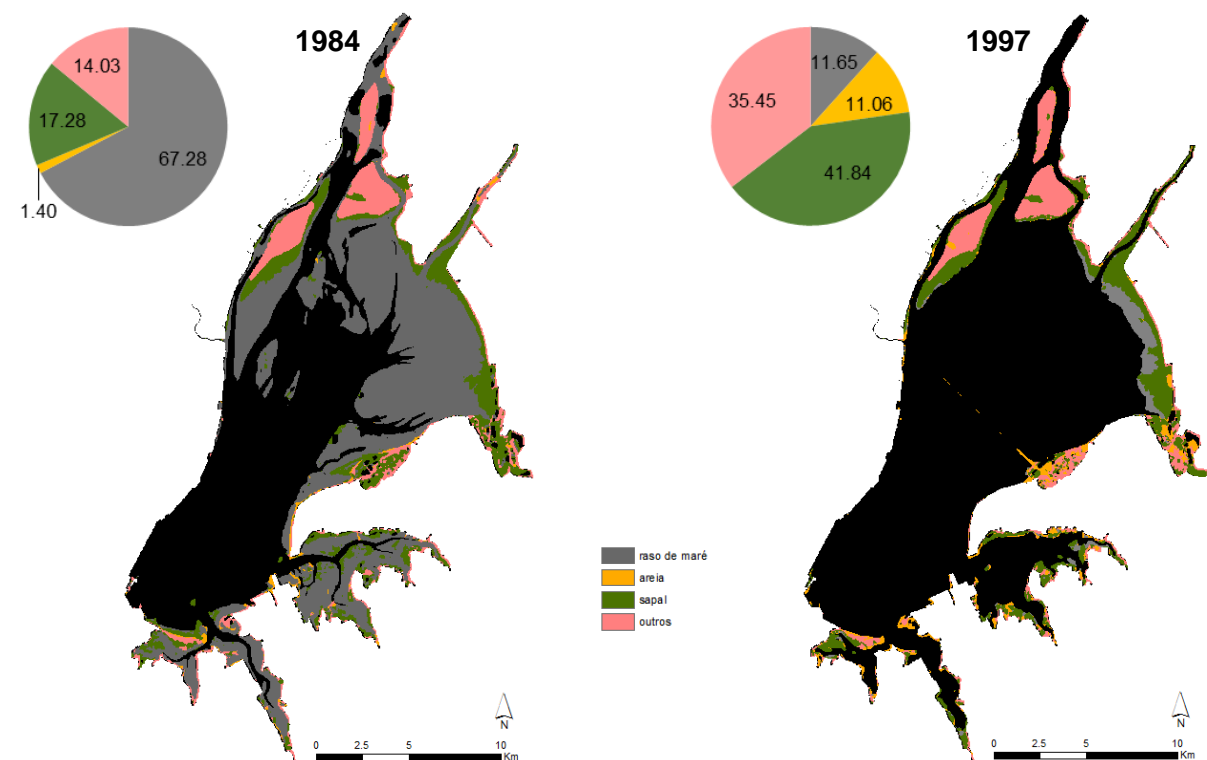


Figura 7.6. Pormenor da classificação na imagem de 2013, com indicação da LMPMAVE (a vermelho) e da LMPMAVE+50m (a azul): **(a)** imagem Google EarthTM de 08/07/2012; **(b)** imagem compósita Landsat 4567; **(c)** imagem classificada; **(d)** imagem classificada com 3 filtros generalização.

A observação das imagens resultantes da classificação (no **Anexo 2**) e da **Tabela 6.2** mostra, essencialmente, que o nível da maré no momento da sua aquisição é um fator decisivo na quantificação de áreas e na delimitação dos elementos de ocupação localizados a cotas mais baixas (como é o caso dos rasos de maré). As imagens de 1984 e 1997 (**Figura 7.7**) representam os extremos das situações de maior e de menor número total de píxeis contabilizado, respetivamente, correspondentes a uma diferença de marés de aproximadamente um metro, que se traduz numa diferença de mais de 119000 píxeis, ou seja, mais de 107 km² (considerando píxeis representativos de 30x30 metros), correspondentes a cerca de um terço da área total do estuário (300 a 340 km²). Esta diferença vai condicionar todos os valores de proporções entre as diferentes classes (gráficos circulares da **Figura 7.7**), mesmo as que mantêm valores absolutos

semelhantes em ambas as datas (caso das classes “sapal” e “outros” nos exemplos de 1984 e 1997, com valores absolutos na ordem dos 20000 a 30000 píxeis, mas com diferenças de proporções superiores a 20 %).



ano	#	marés		raso		areia		sapal		outros	
		ZH	NMM	%	#	%	#	%	#	%	#
1997	66956	1.91	-0.17	11.65	7800	11.06	7406	41.84	28015	35.45	23735
1984	186082	0.86	-1.22	67.28	125204	1.40	2603	17.28	32164	14.03	26111

Figura 7.7. Imagens classificadas generalizadas dos anos 1984 e 1997 e respetivos valores absolutos e relativos de ocupação do solo.

Para que façam sentido do ponto de vista das alterações morfológicas dos diferentes elementos representados pelas várias classes, as comparações têm de ser feitas entre imagens classificadas com níveis de maré semelhantes. Ordenando a **Tabela 6.2** de acordo com o número de píxeis emersos (**Tabela 7.1**), é possível escolher, para comparação, pares de imagens que deverão ter aproximadamente o mesmo número de píxeis emersos e, de preferência, pertencer à mesma série de imagens (ao mesmo sensor), para manter as mesmas características espectrais.

Tabela 7.1. Tabela 6.2 reordenada por número de píxeis emersos.

ano	#	marés		raso		areia		sapal		outros	
		ZH	NMM	%	#	%	#	%	#	%	#
1997	66956	1.91	-0.17	11.65	7800	11.06	7406	41.84	28015	35.45	23735
2005	113 887	1.35	-0.73	47.67	54293	0.86	982	28.88	32894	22.58	25718
2013	118 311	1.12	-0.96	50.52	59766	2.01	2382	21.36	25267	26.11	30896
2014	122 401	1.18	-0.90	48.50	59365	2.27	2779	29.98	36701	19.24	23556
2012	135 516	1.07	-1.01	55.92	75777	2.58	3490	24.90	33739	16.61	22510
2010	135 991	1.37	-0.71	58.47	79515	1.86	2528	22.19	30178	17.48	23770
2002	138608	1.68	-0.40	53.25	73813	3.56	4928	25.56	35432	17.63	24435
2008	139 934	1.26	-0.82	55.02	76985	1.81	2537	24.58	34394	18.59	26018
1978	147856	1.38	-0.70	64.83	95860	3.32	4916	17.26	25520	14.58	21560
2007	152 784	0.79	-1.29	60.89	93035	2.18	3325	20.91	31942	16.02	24482
2001	155618	1.60	-0.48	55.31	86066	4.83	7509	25.70	39996	14.17	22047
2004	155835	1.11	-0.97	65.05	101367	4.42	6883	13.37	20841	17.16	26744
2000	160581	0.81	-1.27	63.52	102003	3.79	6090	15.69	25191	17.00	27297
2009	163 178	1.00	-1.08	63.87	104227	1.76	2871	16.77	27372	17.59	28708
1991	165366	1.04	-1.04	62.11	102702	3.44	5681	20.26	33511	14.19	23472
2003	168 485	1.09	-0.99	64.31	108361	3.49	5887	14.96	25197	17.24	29040
1984	186082	0.86	-1.22	67.28	125204	1.40	2603	17.28	32164	14.03	26111

Comparando as imagens de 1984 e de 2003, pertencentes à mesma série (Landsat 5) e apresentando as maiores superfícies emersas entre todas as imagens analisadas neste trabalho (com uma média de cerca de 177000 píxeis e marés de cerca de 1 m ZH), percebe-se que algumas das diferenças entre as imagens poderão ser resultantes de verdadeiras evoluções morfológicas ao longo dos quase 20 anos de intervalo, enquanto outras se devem a diferenças na própria classificação (**Figura 7.8**). Exemplos de diferenças resultantes do processo de classificação estão localizados pelas setas a vermelho e incluem locais como o raso de maré areno-vasoso a norte da Restinga do Alfeite, onde os bancos de ostras foram classificados como sapal, estando classificados essencialmente como elementos arenosos ou vasosos em 2003 (**Figura 7.9**). Mais a norte no estuário, os tanques no interior do mouchão foram classificados como sapal na imagem de 1984, e os canais junto aos mouchões, que estavam cobertos de nuvens no momento de aquisição da mesma imagem, foram classificados como raso de maré.

Exemplos de verdadeira evolução morfológica, localizados pelas setas a azul na **Figura 7.8** e na **Figura 7.10**, incluem locais como o Sapal de Corroios, que se adensou, preenchendo alguns dos canais que o recortavam, ou a construção dos tanques de piscicultura, que não existiam em 1984 (a área estava preenchida por sapal e corretamente classificada) e cuja obra estava embargada em 2003 (Público, 2015), estando a área preenchida por aterro e classificada corretamente como “outros”, estando já em funcionamento em 2013 (em que foi corretamente classificada como água - **Figura 6.6**).

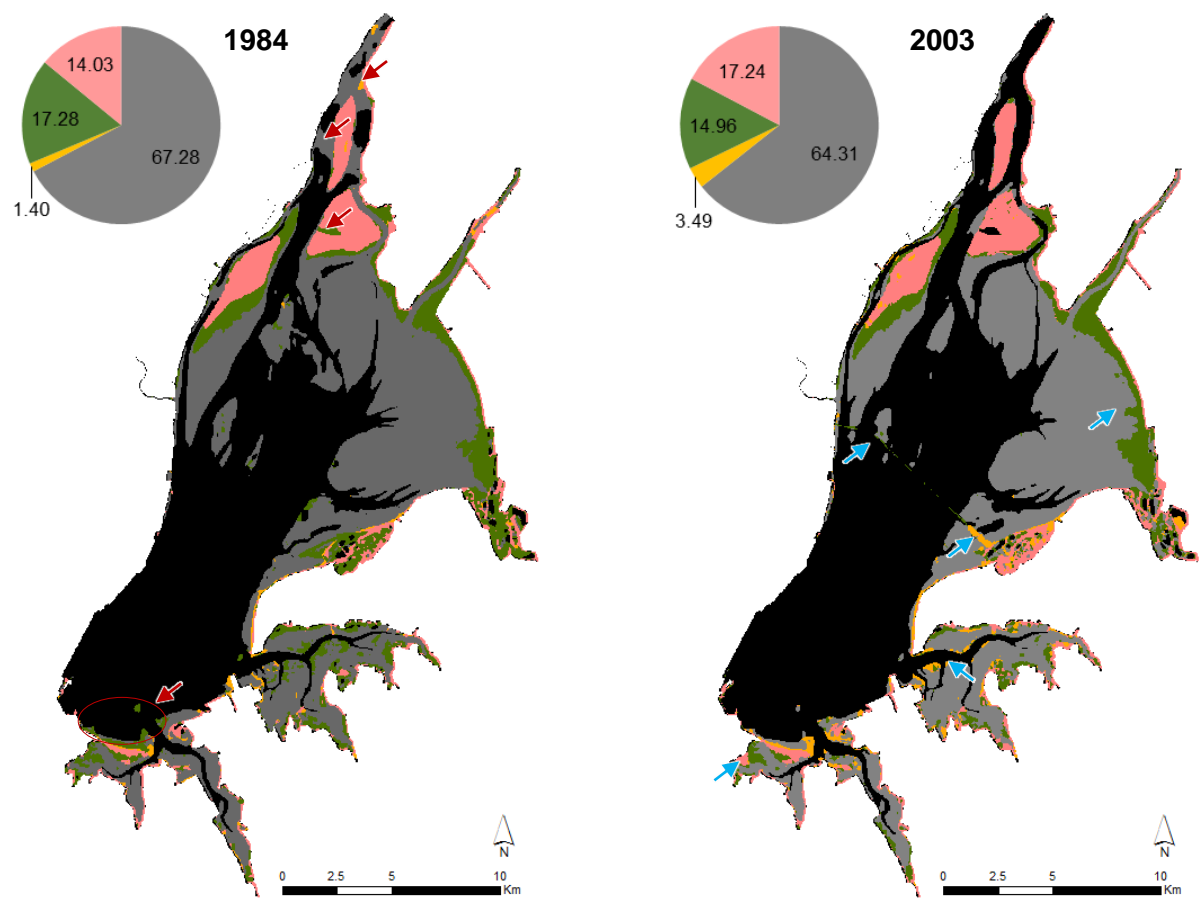


Figura 7.8. Imagens classificadas generalizadas dos anos 1984 e 2003 e respectivos valores de ocupação do solo.

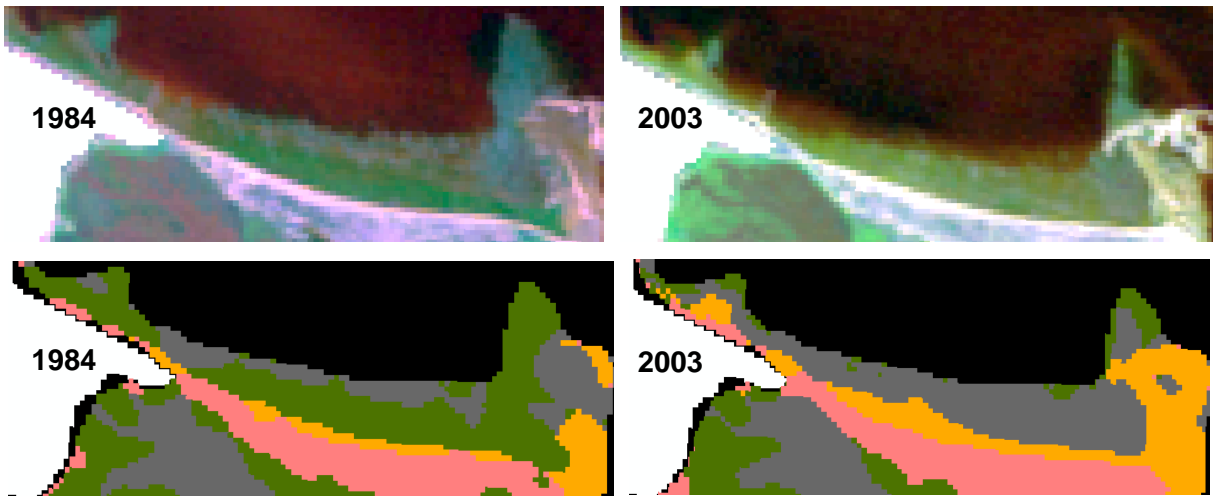


Figura 7.9. Evolução da zona do raso areno-vasoso a norte da Restinga do Alfeite, entre 1984 e 2003 (imagens compostas com as bandas 3457 em cima e imagens classificadas generalizadas em baixo).

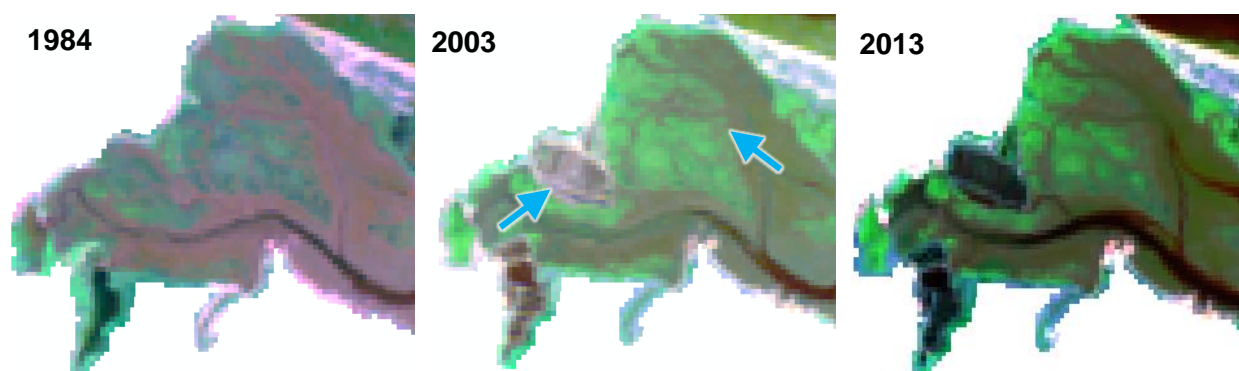


Figura 7.10. Evolução da zona do Sapal de Corroios entre 1984, 2003 e 2013 (imagens compósitas com as bandas 3457).

Outros exemplos de verdadeira evolução podem ser observados ao longo do Canal do Montijo (**Figura 7.11**), onde há uma aparente substituição das zonas de ostras por bancos de areia, um adensamento dos bancos arenosos que formam a Ilha do Rato (com preenchimento por sapal) e uma aparente translação para sul e engrossamento dos bancos associados à Restinga da Ponta da Passadeira.

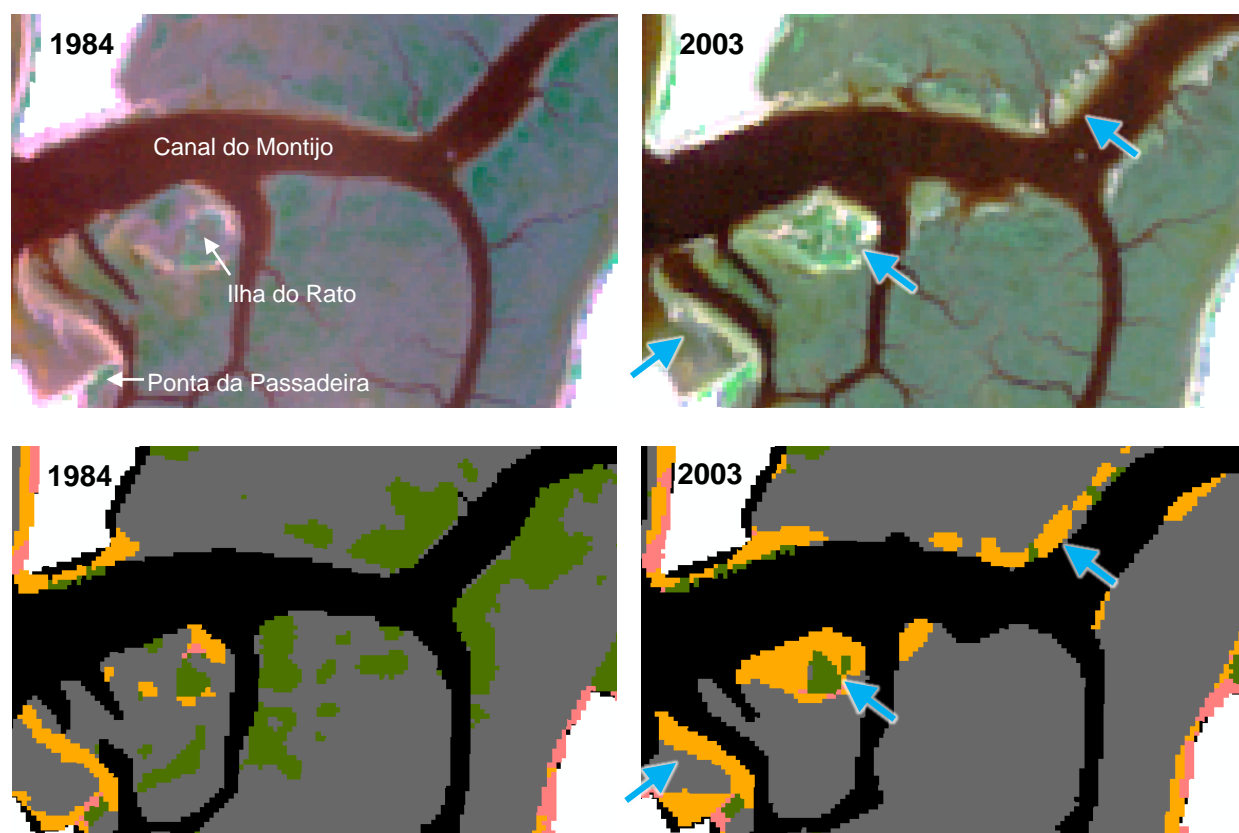


Figura 7.11. Evolução na zona do Canal do Montijo entre 1984 e 2003 (imagens compósitas com as bandas 3457 e imagens classificadas generalizadas).

A construção da Ponte Vasco da Gama provocou alterações na hidrodinâmica de certas zonas do estuário (**Figura 7.8**), tendo desaparecido parte dos rasos de maré (onde ainda se observam alguns bancos de ostras) na zona a sul do Mouchão da Póvoa, e surgido novas zonas arenosas junto aos pilares no seu extremo sudeste (possivelmente resultantes de aterros para os pilares).

Na zona nordeste do estuário (Sapal de Pancas) é possível observar-se um adensamento dos sapais e, em alguns pontos, algum avanço destes sobre os rasos de maré adjacentes, bem documentados pelas imagens classificadas respetivas e pela linha que delimita o sapal de 1984, sobreposto à imagem classificada de 2003 (**Figura 7.12**).

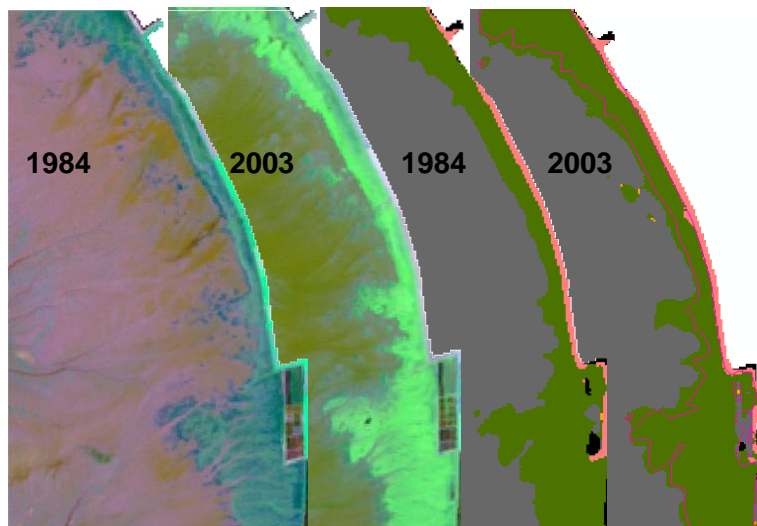
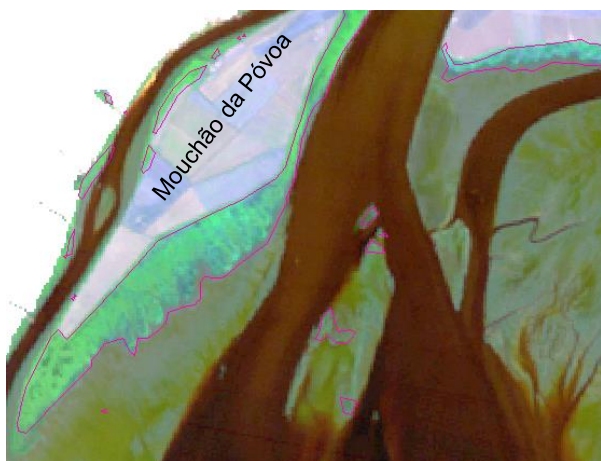


Figura 7.12. Evolução na zona do Sapal de Pancas entre 1984 e 2003 (imagens compósitas com as bandas 3457 e imagens classificadas generalizadas), com representação do limite do sapal de 1984 na imagem classificada de 2003.



A mesma linha de delimitação do sapal, aplicada na zona norte do estuário (junto aos mouchões), sugere uma tendência inversa à descrita, com aparente recuo do sapal em direção aos mouchões adjacentes (**Figura 7.13**).

Figura 7.13. Imagem compósita de 2003 (bandas 3457) com sobreposição da linha de delimitação do sapal de 1984.

Analisando duas outras imagens, de 1991 e de 2000 (**Figura 7.14**), desta vez de séries diferentes (Landsat 5, sensor TM e Landsat 7, sensor ETM+ SLC-on), mas com níveis de maré e quantidade de píxeis emersos semelhantes, o resultado da comparação é semelhante ao descrito para comparação entre 1984 e 2003, com substituição de zonas de ostreiras

(classificadas como “sapal”) por bancos arenosos e rasos de maré, engrossamento de restingas e praias na Baía do Montijo, o aparecimento do aterro nos pilares da Ponte Vasco da Gama e um ligeiro recuo do sapal na zona adjacente aos mouchões. Em termos quantitativos os resultados das duas imagens são bastante semelhantes, sugerindo alguma segurança na comparação entre imagens de séries diferentes.

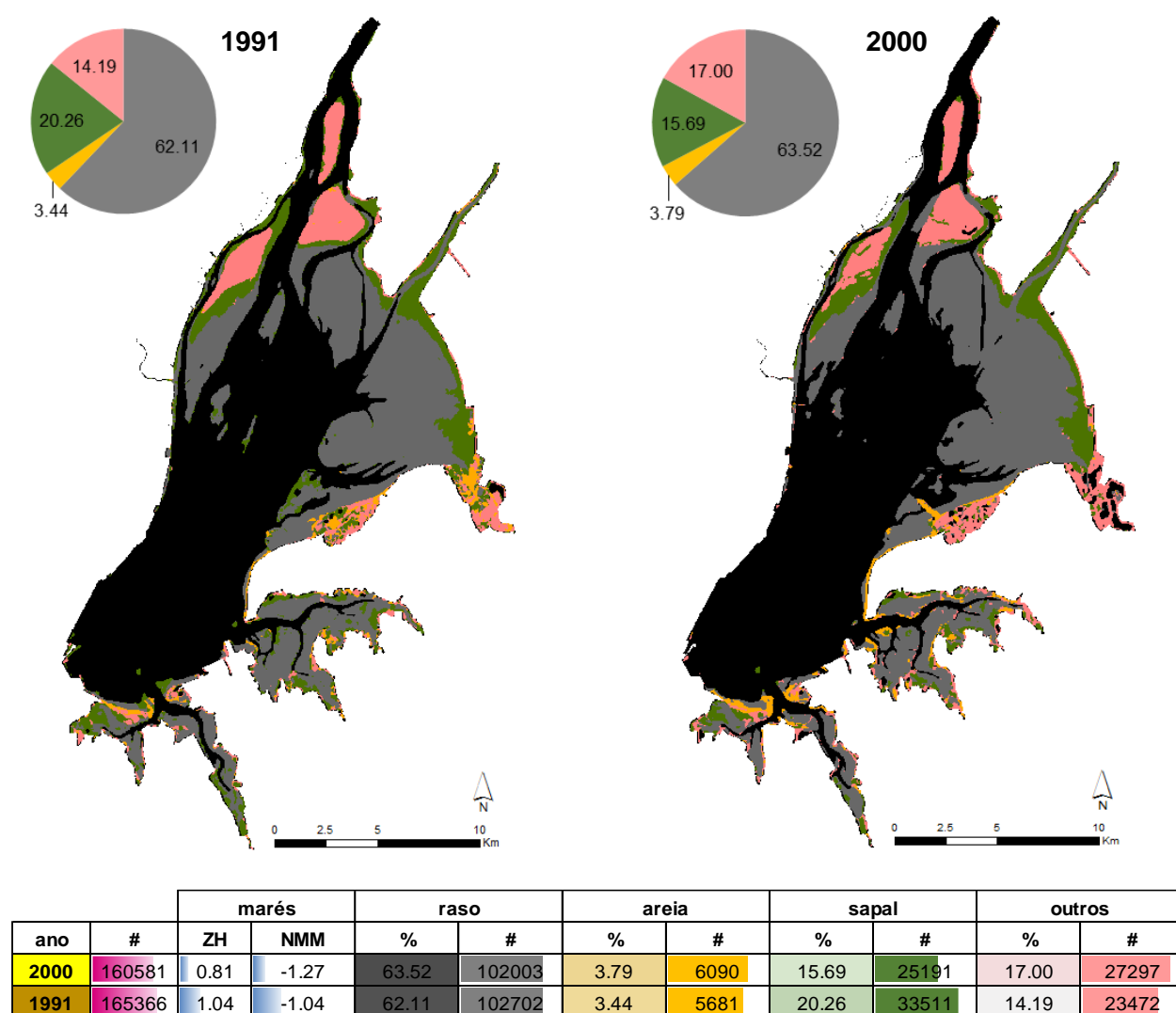


Figura 7.14. Imagens classificadas generalizadas dos anos 1991 e 2000 e respetivos valores de ocupação do solo.

Comparando as imagens de 1978 e 2008, com 30 anos de intervalo (**Figura 7.15**), pertencentes a duas séries bastante diferentes do programa Landsat (sendo a primeira do sensor MSS, do Landsat 1 e a segunda do sensor ETM+ do Landsat 7, SLC-off), os resultados são bastante coerentes, apesar da diferença na resolução espacial das duas imagens e da presença das bandas resultantes da avaria do sistema SLC. Verifica-se, mais uma vez, o referido adensamento e avanço do Sapal de Pancas (**Figura 7.16**).

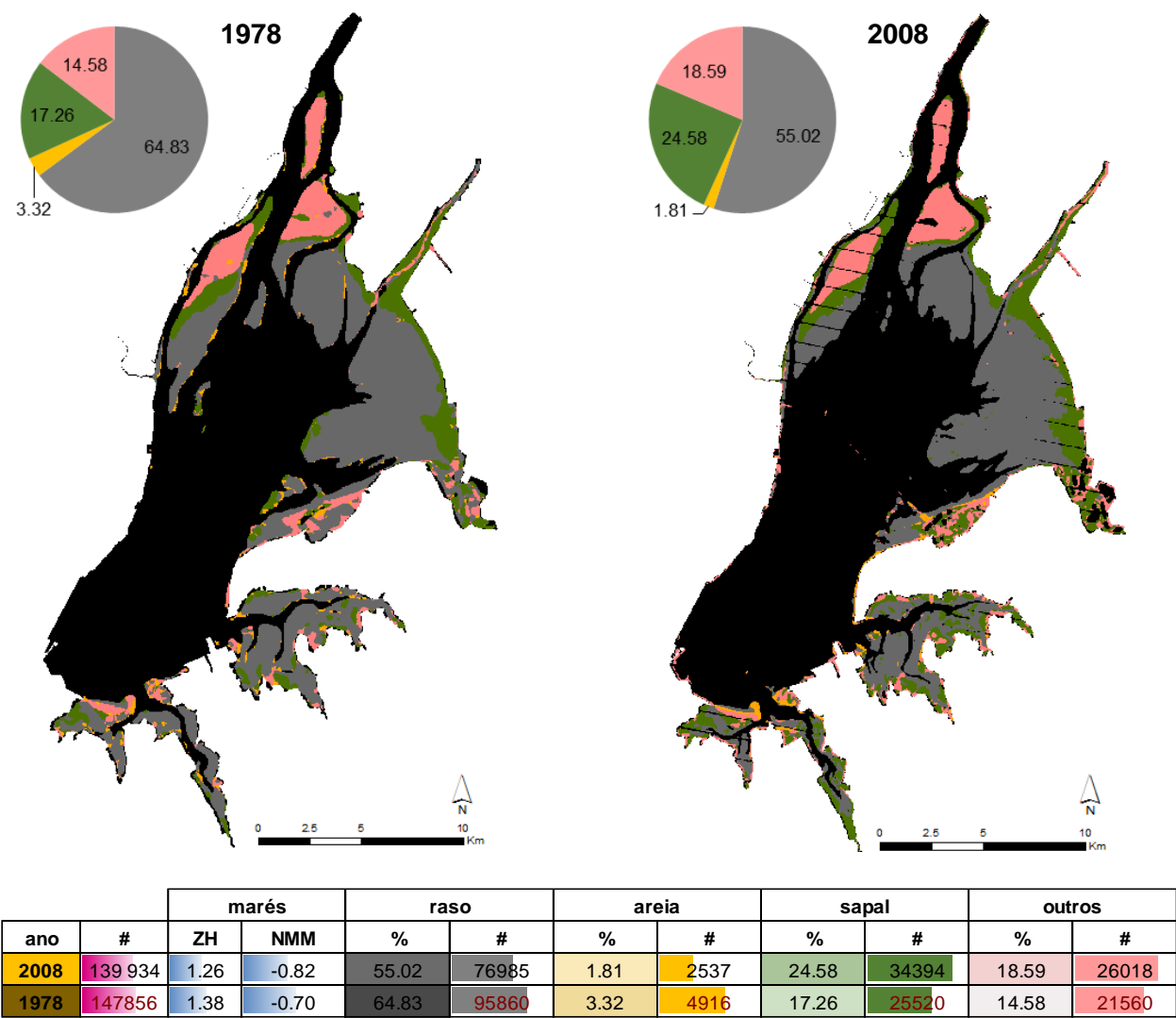


Figura 7.15. Imagens classificadas generalizadas dos anos 1978 e 2008 e respetivos valores de ocupação do solo.

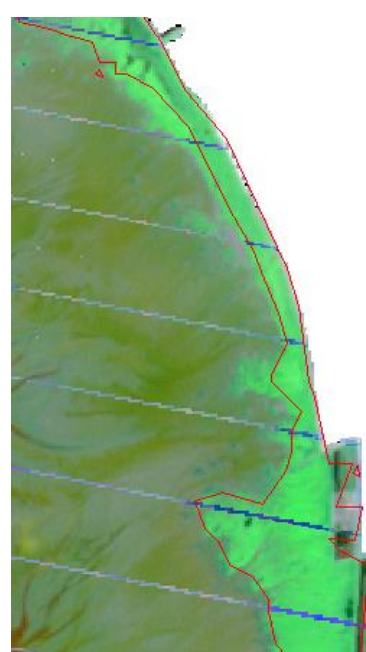


Figura 7.16. Evolução na zona do Sapal de Pancas entre 1978 e 2008: imagem compósita de 2008 com as bandas 3457, com representação do limite do sapal de 1978.

Isolando a classe “sapal” resultante das imagens classificadas de todos os anos analisados e fundindo os 17 diferentes ficheiros de sapal (com utilização da ferramenta “Merge”) para a totalidade do estuário, obteve-se a imagem da **Figura 7.17**, que permite avaliar a evolução do elemento morfológico natural que menos influência sofre da altura de maré no processo de classificação semi-automática descrito neste trabalho. A escala de cores escolhida, com as datas mais antigas a verde, às quais se sobrepõem as mais recentes, a vermelho, permite detetar zonas que foram classificadas como sapal no intervalo entre 1978 e 2005, mas que nas datas mais recentes não voltaram a ter essa classificação. Isto deve-se, por um lado, à maior qualidade das imagens recentes (devida à maior resolução espectral, entre outros fatores), que permite ao classificador distinguir a classe “sapal” da classe “raso de maré” (na qual estão incluídas as ostras, que se confundem com a classe “sapal” nas imagens mais antigas). Por outro lado, é conhecido que, nas últimas décadas, os bancos de ostras sofreram forte erosão e desaparecimento, devido principalmente ao declínio da produção comercial destes moluscos, resultando numa efetiva redução da sua superfície no leito do estuário.

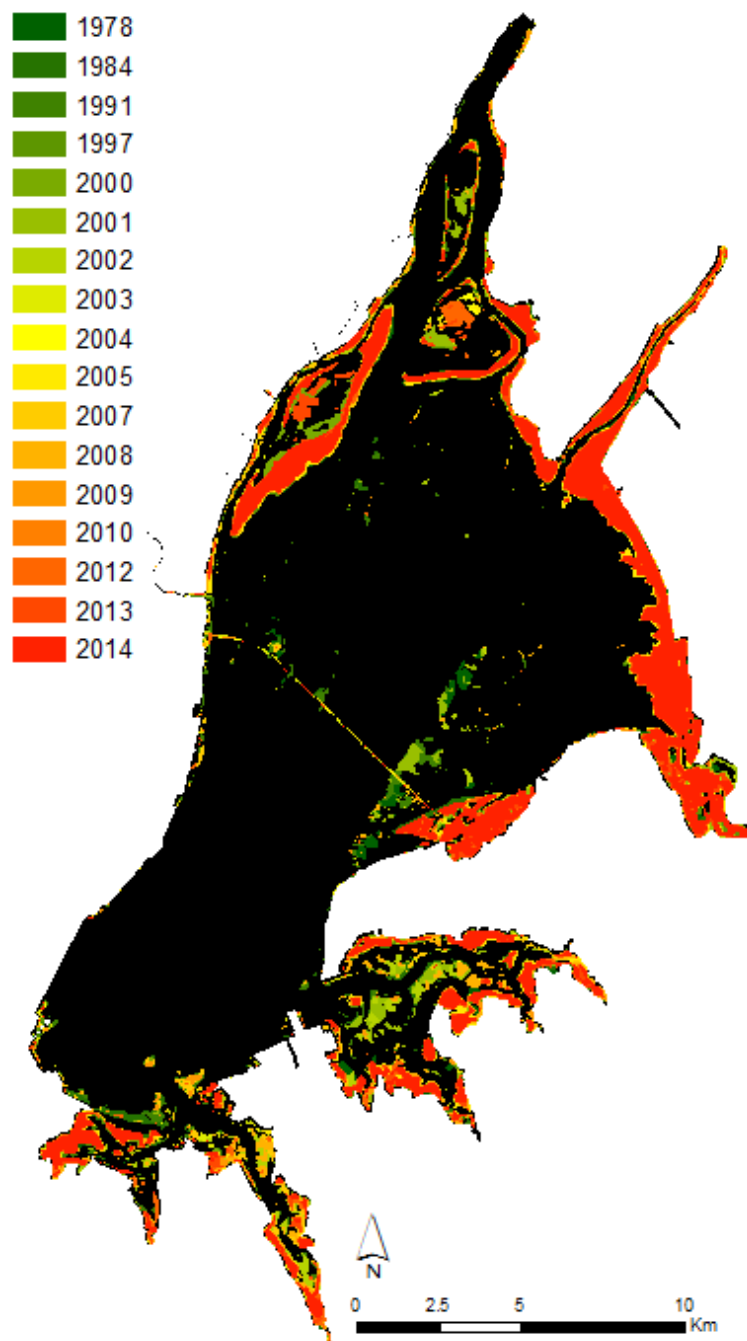


Figura 7.17. Representação da classe “sapal” sob a forma de polígonos.

A transformação da simbologia dos polígonos da classe “sapal” para contornos, permite não só identificar os principais problemas do processo de classificação, como avaliar a evolução destes elementos morfológicos ao longo do tempo (**Figura 7.18**).

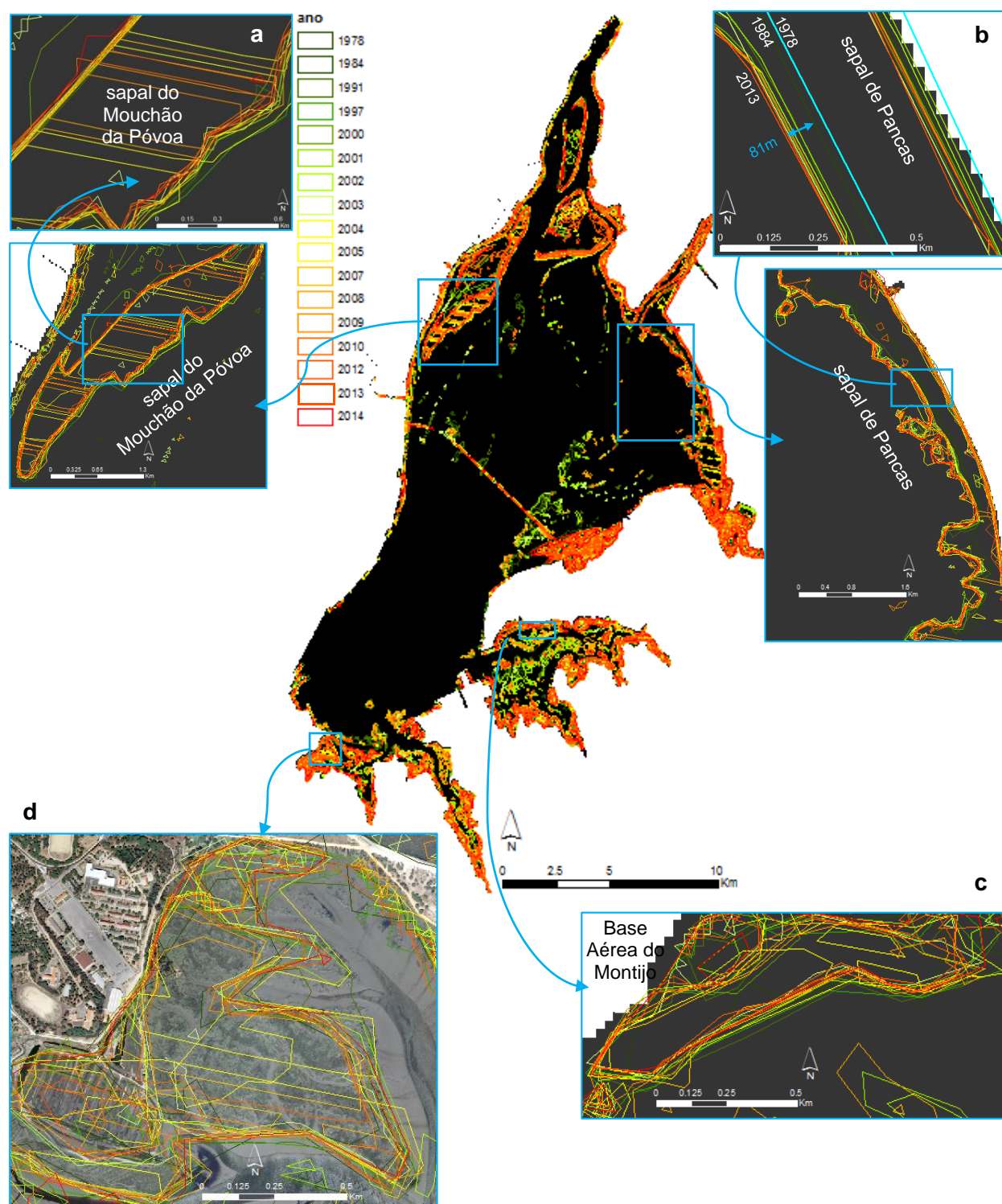


Figura 7.18. Contornos da classe sapal para todos os anos analisados, com pormenores nas zonas do Mouchão da Póvoa (**a**), do Sapal de Pancas (**b**), da Base Aérea do Montijo (**c**) e do Sapal de Corroios (**d**).

Na **Figura 7.18.a** (pormenor do sapal do Mouchão da Póvoa), as faixas de direção aproximada ESSE-WNW resultam da falha no sistema SLC do sensor Landsat 7. Neste troço do sapal o resultado da classificação é consistente, com distâncias de cerca de 50 m entre as linhas de 1991 e 2014 na zona dos diques de lama artificiais (que delimitam a zona agrícola do mouchão) e cerca de 100 m no limite com o raso de maré (com as linhas de 2010, 2012 e 2013 mais recuadas e a linha de 1997 mais avançada, sugerindo um recuo de aproximadamente 7 m por ano). Este recuo é consistente com as escarpas de erosão observadas por Silva (2013) na transição entre este sapal e o raso de maré adjacente. No entanto, este sapal sofre acreção vertical de cerca de 1,4 cm por ano, calculada pelo mesmo autor (com recurso a técnicas de datação radiométrica por ^{210}Pb e ^{137}Cs), o que lhe permitirá acompanhar a subida prevista do nível médio do mar (Silva, 2013).

Na **Figura 7.18.b** (pormenor do sapal de Pancas), estão representados os limites de sapal mais consistentes nesta zona (de 1978, 1984, 1991, 2000, 2001, 2002, 2003, 2009, 2012 e 2013), podendo estimar-se uma taxa de avanço expedita neste troço. Foi ignorada a linha referente a 1978 por se encontrar demasiado recuada das restantes, tanto a montante (a 70 m da linha de 2013) como a jusante (a cerca de 105 m da linha de 2013) do sapal (possivelmente devido à sua menor resolução espacial, com píxeis de 60 m de lado). A distância medida (em ArcMap 10.1TM) entre os limites sapal/raso de maré de 1984 e 2013 é de 81 m (sugerindo um avanço aproximado de 3 m por ano, representando tendência inversa à do Sapal do Mouchão da Póvoa), observando-se também uma tendência nas cores das linhas, com a maioria dos tons verdes a montante e a maioria dos amarelados e vermelhos a jusante, confirmando o referido avanço nesta zona. Este avanço é consistente (embora com valores muito mais elevados, devido possivelmente à resolução das imagens Landsat) com os resultados de Silva (2013) para este sapal, que sugerem uma expansão horizontal de 25 m entre 1958 e 2007 (por fotointerpretação em fotografias aéreas) e acreção vertical à taxa de 2,2 cm por ano.

Na **Figura 7.18.c** (sapal da Base Aérea do Montijo) o limite mais recuado é o de 2010 e o mais avançado o de 1991, com cerca de 75 m de distância entre eles, o que corresponde a um recuo de cerca de 4 m por ano neste sapal. Os limites montante são muito irregulares, porque a fronteira faz-se com um reservatório de água, classificado como “água”, “sapal” ou “outros” em imagens diferentes (devido a alterações na ondulação provocada pelo vento, ou no ângulo da luz incidente).

A **Figura 7.18.d** mostra o principal motivo da dificuldade do classificador nas zonas de sapal, pela irregularidade e forte alternância entre sapal e canais preenchidos por vasas, sendo o resultado final influenciado pelo processo de generalização aplicado no pós-processamento. No Sapal de Corroios é difícil definir uma tendência evolutiva, havendo alguma mistura de cores

nos seus limites. Silva (2013) calculou a sua taxa de acreção vertical (0,6 cm/ano) e refere o risco deste sapal não conseguir acompanhar a subida do NMM prevista para o próximo século.

8. CONCLUSÕES

A partir de imagens Landsat de diferentes datas foi possível criar modelos semi-automáticos de classificação assistida em software Esri® ArcMap 10.1™, para delimitar morfologias marginais no Estuário do Tejo. As elevadas resoluções espacial, radiométrica e espectral das imagens Landsat e a possibilidade de combinar e realizar operações entre bandas, convertem este tipo de imagens numa ferramenta poderosa na cartografia de ocupação do solo. O curto tempo de revisitação dos satélites e a elevada cobertura temporal do programa permitem realizar estudos de alterações da superfície terrestre ao longo de várias décadas.

Os passos mais importantes na criação destes modelos foram, inicialmente, uma boa escolha das imagens (sem nebulosidade e com marés muito baixas), seguida de uma boa escolha da combinação de bandas, de forma a realçar os elementos de maior interesse, seguida de uma rigorosa delimitação dos polígonos de treino, validados com dados fiáveis (de campo ou de fotointerpretação de imagens de resolução mais elevada). A aplicação de filtros generalização no pós-processamento foi importante, por homogeneizar os resultados classificados, tornando-os mais consistentes com o *ground truth*.

Os modelos criados revelaram-se úteis e fiáveis na zona piloto (a Restinga do Alfeite), com boa precisão global no processo de classificação, mas quando aplicados a uma área maior mostraram-se menos robustos, devido à maior complexidade de morfologias presentes, associada a possíveis variações nas características da iluminação e da dispersão atmosférica numa área mais extensa. Para a totalidade do estuário, poder-se-á assumir que as principais variações em termos de superfície coberta por cada classe se devem, por um lado, às diferentes alturas de maré em diferentes imagens e, por outro, a diferentes critérios na atribuição de classes às diferentes refletâncias por parte do classificador automático (devidos a polígonos de treino pouco representativos das classes respetivas, ou a imagens com características diferentes entre si). Isto exige um maior esforço no futuro para aperfeiçoar os modelos, acrescentando-lhes, no pré-processamento, correções radiométricas que permitam equiparar as diferentes imagens entre si em termos de refletâncias, ou validações de campo em outras zonas do estuário, para uma melhor delimitação dos polígonos de treino.

A análise da evolução da classe “duna, praia e bancos arenosos” na Restinga do Alfeite parece ser a que mais beneficiou do método aqui descrito, por representar elementos com elevada homogeneidade nos valores de refletância e contraste suficiente relativamente à classe envolvente (a água). Conclui-se que estes bancos sofreram translação para ocidente e rotação no sentido sinistrogiro entre 1845 e 2013, com um aparente avanço do limite entre a praia e o

raso de maré desde 1958. Algumas destas alterações poderão estar relacionadas com a construção do Arsenal do Alfeite, que terá contribuído para reduzir a quantidade de sedimento disponível para alimentar a restinga, aliada ao aumento da frequência de passagem de navios a oriente após a década de 1970 e às dragagens necessárias para manter a navegabilidade dos principais canais.

Apesar das dificuldades, a aplicação do método à totalidade do estuário permitiu perceber algumas das alterações verificadas nas últimas décadas: a redução das manchas de ostras e sua substituição por rasos de maré ou bancos arenosos; o avanço do sapal de Pancas, o recuo do sapal do Mouchão da Póvoa e o adensamento do sapal de Corroios; o aparecimento de aterros na margem sul e o desaparecimento de parte dos rasos de maré a norte, associados à construção da Ponte Vasco da Gama.

As tendências observadas devem ser discutidas com base na evolução do hidrodinamismo local e em todo o Estuário do Tejo, dependente de vários fatores naturais e antrópicos, desde o regime dos ventos locais e as flutuações do nível do mar, até às diversas alterações realizadas pelo Homem na morfologia geral do estuário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, Teresa Maria Luís Dias de - *Flora e vegetação dos salgados de Coima, Corroios e Alcochete*. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia, 2009. Dissertação de mestrado em Engenharia Agronómica. Disponível na Internet: <URL:<http://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/1073>>.
- AMORIM, Alexandra Isabel Neves - *Utilização de imagens de satélite no estudo da evolução do banco de areia emerso da Restinga do Alfeite*. Lisboa: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2014. Trabalho final da disciplina de Sistemas de Informação Geográfica Aplicados: mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território. Disponível na Internet: <URL:http://media.wix.com/ugd/9c4daf_c198135c78834c45b076b3a56de465f7.pdf>.
- ANDRADE, César Freire de - *Dinâmica, Erosão e Conservação das Zonas de Praia*. Lisboa: Parque EXPO 98, S.A.: Edição do Comissariado da Exposição Mundial de Lisboa de 1998, 1997.
- ANDRADE, C.; FREITAS, M.C. - Architecture and Recent Development of an Estuarine Detached Beach. The Alfeite Sand Spit (Tagus Estuary, Portugal). In: *Proceedings, Littoral'98 - Eurocoast Fourth International Conference – Sustainable waterfront and coastal developments in Europe: socioeconomics, technical and environmental aspects*. Barcelona, 1998. 101-109.
- CAÇADOR, Isabel; TIBÉRIO, S.; CABRAL, H. N. - Species zonation in Corroios salt marsh in the Tagus estuary (Portugal) and its dynamics in the past fifty years. *Hydrobiologia*. 587 (2007), 205–211. Disponível na Internet: <URL:<http://link.springer.com/article/10.1007/s10750-007-0681-y#page-1>>.
- CAÇADOR, Isabel; DUARTE, Bernardo - Tagus Estuary Salt Marshes Structure and Dynamics: A Historical Perspective. In: *Estuaries: Classification, Ecology and Human Impacts*, Chapter 3 -Publisher: Nova Publishers, Editors: Stephen J. Jordan, 2012. 41-56. Disponível na Internet: <URL:http://www.researchgate.net/publication/235185289_Tagus_Estuary_Salt_marsh_structure_and_dynamics_an_historical_perspective>.
- CODIGA, Daniel L. - *Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions*. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI, 2011. Disponível na Internet: <URL:<http://www.po.gso.uri.edu/pub/downloads/codiga/pubs/2011Codiga-UTide-Report.pdf>>.
- CORREIA, Maria Manuela da Silva - *Utilização de detecção remota para a monitorização temporal do uso do solo no Estuário do Tejo*. Évora, 2003. Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Gestão dos Recursos Biológicos. Disponível na Internet: <URL: http://www.cea.uevora.pt/umc/pdfs/tese_mc.pdf>.
- DRURY, S. A. – *A Guide to Remote Sensing: Interpreting Images of the Earth*. New York: Oxford University Press, 1990.

- FONSECA, Ana Duarte; FERNANDES, João Cordeiro - *Detecção Remota*. Lisboa: Lidel, 2004.
- FREIRE, Paula Maria de Santos - *Evolução Morfo-Sedimentar de Margens Estuarinas: Estuário do Tejo, Portugal*. Lisboa: LNEC, 2003. Tese de Doutoramento.
- FREIRE, Paula, TABORDA, Rui, ANDRADE, César - Caracterização das Praias Estuarinas do Tejo. *8º Congresso da Água*, Figueira da Foz, 13-17 Março, APRH, 2006. 251-252.
- FREIRE, Paula; TABORDA, Rui; SILVA, Ana M. - Sedimentary Characterization of Tagus Estuarine Beaches (Portugal): A contribution to the sediment budget assessment. In: *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 7, n.º 5 (2007), 296-302. Disponível na Internet: <URL: <http://link.springer.com/article/10.1065%2Fjss2007.08.243>>.
- FREIRE, Paula [et al.] - Tipificação das zonas marginais estuarinas. O caso do estuário do Tejo. *2ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisboa: Instituto Hidrográfico, 2012. ISBN: 978-9897050350. 319-322. Disponível na Internet: <URL: http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nec/estudos_id/morfeed/Freire_et%20al.pdf>.
- FREIRE, Paula, JACKSON, Nancy L., NORDSTROM, Karl F. - Defining beaches and their evolutionary states in estuaries. In: *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65 (2013), 482-487. Disponível na Internet: <URL: http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nec/estudos_id/morfeed/Freire_etal_2013.pdf>.
- Gazeta dos Caminhos de Ferro, Nº374 (1903). Disponível na Internet: <URL: http://hemerotecadigital.cm-lisboa.pt/OBRAS/GazetaCF/1903/N374/N374_master/GazetaCFN374.pdf>.
- GOMES FERREIRA, J. - Uma Abordagem Ecosistémica para o Estuário do Tejo. In: *O Plano de Ordenamento do Estuário do Tejo: Saberes e Reflexões. Tágydes, N.º 4 (2009)*, 137-142. Disponível na Internet: <URL: http://www.apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Tagides/tagidespoe.pdf>.
- GUERREIRO, Martha [et al.] - Impacte da subida do nível médio do mar na inundação marginal no estuário do Tejo. *11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa, VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*. Maputo, Moçambique: 2013^a. Disponível na Internet: <URL: http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nec/estudos_id/morfeed/Guerreiro_et_al_2013.pdf>.
- GUERREIRO, Martha [et al.] - *Evolução recente da praia do Alfeite do estuário do Tejo*. MorFeed -Morphodynamic feedback of estuarine margins to climate change. Relatório Técnico. Lisboa: LNEC, 2013^b. Disponível na Internet: <URL: http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nec/estudos_id/morfeed/Relatorio_evolucao_alf_eite_final.pdf>.
- HADJIMITSIS, Diofantos G. [et al.] - Detection of Water Pipes and Leakages in Rural Water Supply Networks Using Remote Sensing Techniques. In: *Remote Sensing of Environment - Integrated Approaches*. HADJIMITSIS, Diofantos G., 2013. ISBN 978-953-51-1152-8. 155-180. Disponível na Internet: <URL: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/45188.pdf>>.
- INSTITUTO DA EDUCAÇÃO - *Orientações básicas para elaborar Referências Bibliográficas*. Divisão de Documentação: Universidade de Lisboa, 2012. Disponível na Internet: <URL: <http://www.ie.ulisboa.pt/pls/portal/docs/1/394817.PDF>>.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) - Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013. Disponível na Internet: <URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SPM_brochure_en.pdf>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) - Approved Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014: IPCC Fifth Assessment Synthesis Report*, 2014. Disponível na Internet: <URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_SPM.pdf>.
- KLEMAS, Victor - Sensors and Techniques for Observing Coastal Ecosystems. In: *Remote Sensing and Geospatial Technologies for Coastal Ecosystem Assessment and Management*. Xiaojun, Yang (Ed.). Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-88182-7; DOI 10.1007/978-3-540-88183-4. Disponível na Internet: <URL: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-88183-4_2>.
- KLEMAS, Victor - Remote sensing of wetlands: case studies comparing practical techniques. In: *Journal of Coastal Research*. ISSN 0749-0208. Vol. 27(3). (2011), 418–427. Disponível na Internet: <URL: <http://www.bioone.org/doi/pdf/10.2112/JCOASTRES-D-10-00174.1>>.
- LEI n.º 54/2005. “Diário da República Série I-A”. 219 (15/11/2005) 6520-6525.
- LIMA, Manuel - Lagos de maré nas quintas senhoriais do Seixal. In: *Movimento Cultural*, Ano 4, n.º6. Setúbal: Associação dos Municípios do Distrito de Setúbal, 1989. 139-144. Disponível na Internet: <URL: <http://www.amrs.pt/movimento-cultural/mc6/index.html>>.
- LIMA, Manuel - *Terras de Larus: encontros com o património natural e ambiental do concelho do Seixal*. Seixal: Câmara Municipal do Seixal. Lisboa: Plátano, D.L. 1997.
- LIMA, Manuel - *A Reserva Ecológica Nacional do concelho do Seixal: contributos para a sua descrição e divulgação*. Seixal: Câmara Municipal do Seixal, 1997.
- LIRA, Cristina; Taborda, Rui - Evolução do banco de areia emerso do Bugio com recurso a imagens do satélite Landsat. *2ª Conferência sobre morfodinâmica estuarina e costeira*. Universidade de Aveiro, 2013.
- LIU, Jian Guo, MASON, Philippa J. - *Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing*. John Wiley & Sons Ltd, 2009. ISBN: 9780470510322.
- MARTÍNEZ VEGA, J. [et al.] - *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*. Red Nacional de Teledetección Ambiental, 2010. Disponível na Internet: <URL: http://www.aet.org.es/files/guia_teledeteccion_medio_ambiente.pdf>.
- MASSELINK, Gerhard; HUGHES, Michael G.; KNIGHT, Jasper - *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. 2nd ed. London: Hodder Education, 2011. ISBN: 9781444122404.
- MATHER, Paul M. - *Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction*. 3rd ed. John Wiley & Sons Ltd, 2004. ISBN: 0-470-84918-5 (HB); 0-470-84919-3 (PB).

- NABAIS, António – Arqueologia industrial: os moinhos de maré na margem sul do estuário do rio Tejo. In: *Movimento Cultural*, Ano 2, n.º3. Setúbal: Associação dos Municípios do Distrito de Setúbal, 1986. 33-40.
- NABAIS, António - *História do Concelho do Seixal: Património Industrial: Moinhos de Maré*. Câmara Municipal do Seixal, 1986.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration) - *Landsat 7 Science Data Users Handbook*. Landsat Project Science Office, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1999. Disponível na Internet: <URL: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/>>.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration) - *How Landsat Images are Made*: NASA's Landsat Education and Public Outreach team, 2006^a. Disponível na Internet: <URL: http://landsat.gsfc.nasa.gov/pdf_archive/How2make.pdf>.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration) - *Working with Landsat Data*. A Landsat Education and Public Outreach Presentation, 2006^b. Disponível na Internet: <URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2012/12/intro2landsat.pdf>>.
- NOGUEIRA MENDES, R. [et al.]. - Deteção remota e cartografia do intertidal: o contributo do projecto MORFEED. In: *2^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisboa: Instituto Hidrográfico, 2012. ISBN 978-989-705-035-0. 341-344. Disponível na Internet: <URL: http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nec/estudos_id/morfeed/Mendes%20et%20al.pdf>.
- NOGUEIRA MENDES, R. [et al.]. - Cartografia e Monitorização Cartográfica do Intertidal do Estuário do Tejo através de Deteção Remota e imagens de Landsat7 ETM. In: *2^a Conferência sobre morfodinâmica estuarina e costeira*. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2013. Disponível na Internet: <URL: http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nec/estudos_id/morfeed/Mendes%20et%20al.pdf>.
- OLIVEIRA, Gabriela - Caracterização e monitorização das classes de uso do solo na área de intervenção do Plano de Ordenamento da orla Costeira da Costa Sul da Ilha de S. Miguel com recurso à detecção remota por satélite. In: *1º Congresso de Desenvolvimento Regional de Cabo Verde*. Cidade da Praia, 2009, 76-86. Disponível na Internet: <URL: <http://www.apdr.pt/congresso/2009/pdf/Sess%C3%A3o%202/118A.pdf>>.
- PINTO, Pedro - *Sistema de apoio à gestão das zonas costeiras*. Aplicação de um modelo para simulação do crescimento urbano no trecho Ovar-Mira. Lisboa, Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa, 2008. Dissertação de mestrado em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica. Disponível na Internet: <URL: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/2398/1/TSIG0041.pdf>>.
- REBELO, L.-M.; FINLAYSON, C. M., NAGABHATLA, N. - Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. In: *Journal of Environmental Management*. DOI:10.1016/j.jenvman.2007.06.027. Vol. 90 (2009), 2144-2153. Disponível na Internet: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479708000352>>.
- RAPOSO, Jorge; SANTOS, Cézer; HENRIQUE, José Carlos - Ponta do Mato (Seixal): Geoarqueologia e ocupação humana da frente ribeirinha. In: *2º Encontro Sobre o Património de Almada e Seixal* [em linha]. Instituto Piaget, 19-21 Abril, 2013. Disponível na Internet: <URL: <http://www.academia.edu/>>.

- RILO, Ana [et al.] - Metodologia para o traçado da Linha de Máxima Preia-Mar de Águas Vivas Equinociais em ambientes de transição: aplicação ao estuário do Tejo (Portugal). In: *Revista da Gestão Costeira Integrada*. DOI: 10.5894/rgci450. Vol. 14, n.º1 (2014), 95-107. Disponível na Internet: <URL: <http://www.aprh.pt/rgci/revista14f1.html>>.
- RYU, Joo-Hyung; WON, Joong-Sun; MIN, Kyung Duck - Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: A case study in Gomso Bay, Korea. In: *Remote Sensing of Environment*. Vol. 83 (2002), 442–456. Disponível na Internet: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000597>>.
- SABINS, Floyd F. - *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. New York: W.H. Freeman and Company, 2000. ISBN: 0716724421 9780716724421.
- SILVA, Tiago - *Sedimentologia e morfodinâmica de sapais do estuário do Tejo em cenários de alteração climática*. Lisboa: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2013. Dissertação de mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território.
- SILVA, Tiago [et al.] - Geomorphological response of the salt-marshes in the Tagus estuary to sea level rise. In: *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65 (2013), 582-587. Disponível na Internet: <URL: http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nec/estudos_id/morfeed/Silva_etal_2013.pdf>
- TABORDA, Rui, DIAS, J. M. Alveirinho - Análise da sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica durante os temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981. In: *Geonovas Número Especial 1: A Geologia e o Ambiente*. (1992), 89-97. Disponível na Internet: <URL: http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/papers/RN/92_Geonovas.pdf>.
- TINDALL, James - Deconvolution of Plant Type(s) for Homeland Security Enforcement Using Remote Sensing on a UAV Collection Platform. In: *Homeland Security Affairs*. Vol. II, nº1, Article 4 (2006). Disponível na Internet: <URL: <http://www.hsaj.org/?article=2.1.4>>.
- UNIVERSIDADE DE AVEIRO - *Citar e referenciar: norma portuguesa - NP 405*. SBIDM, Aveiro, 2015. Disponível na Internet: <URL: [file:///C:/Users/Amorix/Downloads/NP_%20manual%20ref%20bibliograficas%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Amorix/Downloads/NP_%20manual%20ref%20bibliograficas%20(1).pdf)>.
- USACE (U. S. Army Corps of Engineers) - *Engineering and Design: Remote Sensing: Engineer Manual*. Washington, 2003. Disponível na Internet: <URL: http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2907.pdf>.
- VALENTE, Cátia; FREIRE, Paula; TABORDA, Rui - Evolução morfológica da praia estuarina do Alfeite à Mesoescala. In: *Livro de Resumos do VII Congresso Nacional de Geologia*, Volume II, Évora: Universidade de Évora, 2006. 437-440. Disponível na Internet: <URL: <http://www-ext.lnec.pt/LNEC/bibliografia/DHA/cgeologia06.pdf>>.

WEBSITES CONSULTADOS (com data de consulta do site):

- ArcGIS Resource Center (29/10/2014): <http://resources.arcgis.com/>
- Arsenal do Alfeite (22/9/2014): <http://www.arsenal-alfeite.pt/> (Galeria de Construção do Estaleiro)
- Campo Arqueológico de Tavira (22/9/2014):
<http://www.arkeotavira.com/Mapas/Teixeira/Lisboa.pdf>
- Baía do Seixal (3/12/2014): <http://baiaseixal.hidrografico.pt/>
- Biblioteca Nacional de Portugal (22/9/2014): <http://catalogo.bnportugal.pt/>
- Chulalongkorn University (3/2/2015):
<http://www.sc.chula.ac.th/courseware/2309507/Lecture/remot18.htm>
- Coastal Care (22/9/2014): <http://coastalcare.org/>
- EarthExplorer (várias datas, 2013-2014): <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Earth Observation Portal (21/01/2015): <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions//landsat-1-3>
- Evoa (30/01/2015): <http://www.evoa.pt/index.php?lang=PT>
- Exelis (11/2/2015): <http://www.exelisvis.com/Home/NewsUpdates/TabId/170/ArtMID/735/ArticleID/13618/Push-Broom-and-Whisk-Broom-Sensors.aspx>
- FAO Corporate Document Repository (22/9/2014): <http://www.fao.org/documents/en/>
- Farol da nossa terra (4/2/2015): <http://www.faroldanossaterra.net/2013/02/22/abordagem-a-historia-do-ramal-barreiro-seixal/>
- Flora On (22/9/2014): <http://www.flora-on.pt/>
- Global Warming Art (22/9/2014): <http://www.globalwarmingart.com/wiki/Special:SeaLevel>
- Google Maps (várias datas, 2014): <https://maps.google.pt/>
- IGESPAR (2014): <http://www.igespar.pt/>
- IPCC (2014): <http://www.ipcc.ch/>
- Junta de Freguesia do Seixal (22/9/2014): <http://www.jf-seixal.pt/historia>
- Landsat Science (várias datas, 2014- 2015): <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Linhas de Torres Vedras (22/9/2014):
<http://www.linhasdetorresvedras.com/historia/documentos/>
- Livescience (27/01/2015): <http://www.livescience.com/>
- Mapping & Co. (22/01/2015): <http://mappingandco.com/blog/disfrutando-del-landsat-8-1-parte-especificaciones-tecnicas/>
- MyGuide (22/9/2014): <http://myguide.iol.pt/photo/moinho-de-mar-seixal>
- NASA (19/01/2015): http://science-edu.larc.nasa.gov/EDDOCS/Wavelengths_for_Colors.html
- Panoramio (22/9/2014): <http://www.panoramio.com/photo/19962100>
- Público (9/2/2015): <http://www.publico.pt/local-porto/jornal/piscicultura-dentro-do-sapal-de-corroios-deve-avancar-este-ano-247753>
- SEOS (16/01/2015): <http://www.seos-project.eu/modules/remotesensing/remotesensing-c02-ws01-t.html>
- SMAS Almada (22/9/2014):
http://www.smasalmada.pt/portal/page/portal/front_end_portal_smas_almada/artigo?para_mFolderId=288267*288140*114*pt*ETAR
- Transtejo (22/9/2014): http://www.transtejo.pt/pt/horarios_tarifarios/horarios_detail.aspx
- USGS (várias datas, 2014): <http://www.usgs.gov/>
- What-when-how (22/9/2014): <http://what-when-how.com/remote-sensing-from-air-and-space/landsat-eospectral-imagery-remote-sensing/>

ANEXOS

ANEXO 1

(Características das Imagens Landsat)

Características das imagens Landsat utilizadas (USGS, 1/12/2014, http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php):

As imagens Landsat Multispectral Scanner (MSS) consistem em quatro bandas espectrais com resolução espacial de 60 metros. Cada imagem tem cerca de 170 Km na direção N-S e cerca de 185 Km na direção E-W. As designações específicas de cada banda diferem das séries Landsat 1 a 3 para as séries Landsat 4 a 5.

Multispectral Scanner (MSS)	Landsat 1-3	Landsat 4-5	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 4	Band 1	0.5-0.6	60*
	Band 5	Band 2	0.6-0.7	60*
	Band 6	Band 3	0.7-0.8	60*
	Band 7	Band 4	0.8-1.1	60*

* O tamanho original dos píxeis era 79 x 57 metros; os sistemas de produção atuais recalculam os dados para 60 metros.

As imagens Landsat Thematic Mapper (TM) consistem em sete bandas espectrais com resolução espacial de 30 metros para as bandas 1 a 5 e 7. A resolução espacial da banda 6 (infravermelho térmico) é 120 metros, mas é recalculada para píxeis de 30 metros. Cada imagem tem cerca de 170 Km na direção N-S e cerca de 183 Km na direção E-W.

Thematic Mapper (TM)	Landsat 4-5	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1	0.45-0.52	30
	Band 2	0.52-0.60	30
	Band 3	0.63-0.69	30
	Band 4	0.76-0.90	30
	Band 5	1.55-1.75	30
	Band 6	10.40-12.50	120* (30)
	Band 7	2.08-2.35	30

* A banda TM 6 foi adquirida com resolução especial de 120 metros, mas os produtos processados antes de 25 de fevereiro de 2010 são recalculados para píxeis de 60 metros. Os produtos processados após esta data são recalculados para píxeis de 30 metros.

As imagens Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) consistem em oito bandas espectrais com resolução espacial de 30 metros para as bandas 1 a 7. A resolução

espacial da banda 8 (pancromática) é de 15 metros. Cada imagem tem cerca de 170 Km na direção N-S e cerca de 183 Km na direção E-W.

Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1	0.45-0.52	30
	Band 2	0.52-0.60	30
	Band 3	0.63-0.69	30
	Band 4	0.77-0.90	30
	Band 5	1.55-1.75	30
	Band 6	10.40-12.50	60 * (30)
	Band 7	2.09-2.35	30
	Band 8	.52-.90	15

As imagens **Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)** consistem em nove bandas espectrais com resolução espacial de 30 metros para as bandas 1 a 7 e 9. A nova banda (ultra-azul) é útil em estudos costeiros e de aerossóis. A nova banda 9 é útil para deteção de nuvens cirrus. A resolução espacial da banda 8 (pancromática) é de 15 metros. As bandas térmicas 10 e 11 são úteis na obtenção de temperaturas superficiais mais rigorosas e são obtidas com 100 metros de resolução espacial. Cada imagem tem cerca de 170 Km na direção N-S e cerca de 183 Km na direção E-W.

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) Launched February 11, 2013	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

As bandas TIRS são obtidas com resolução espacial de 100 metros, mas recalculadas para 30 metros nos dados do produto.

ANEXO 2

**(Diferentes morfologias encontradas em vários pontos da extremidade da
restinga e no banco de areia)**



Anexo 2. Diferentes morfologias encontradas em vários pontos da extremidade da restinga e no banco de areia (fotografias: Alexandra Amorim, 2014).

ANEXO 3

(Imagens e valores individuais resultantes)

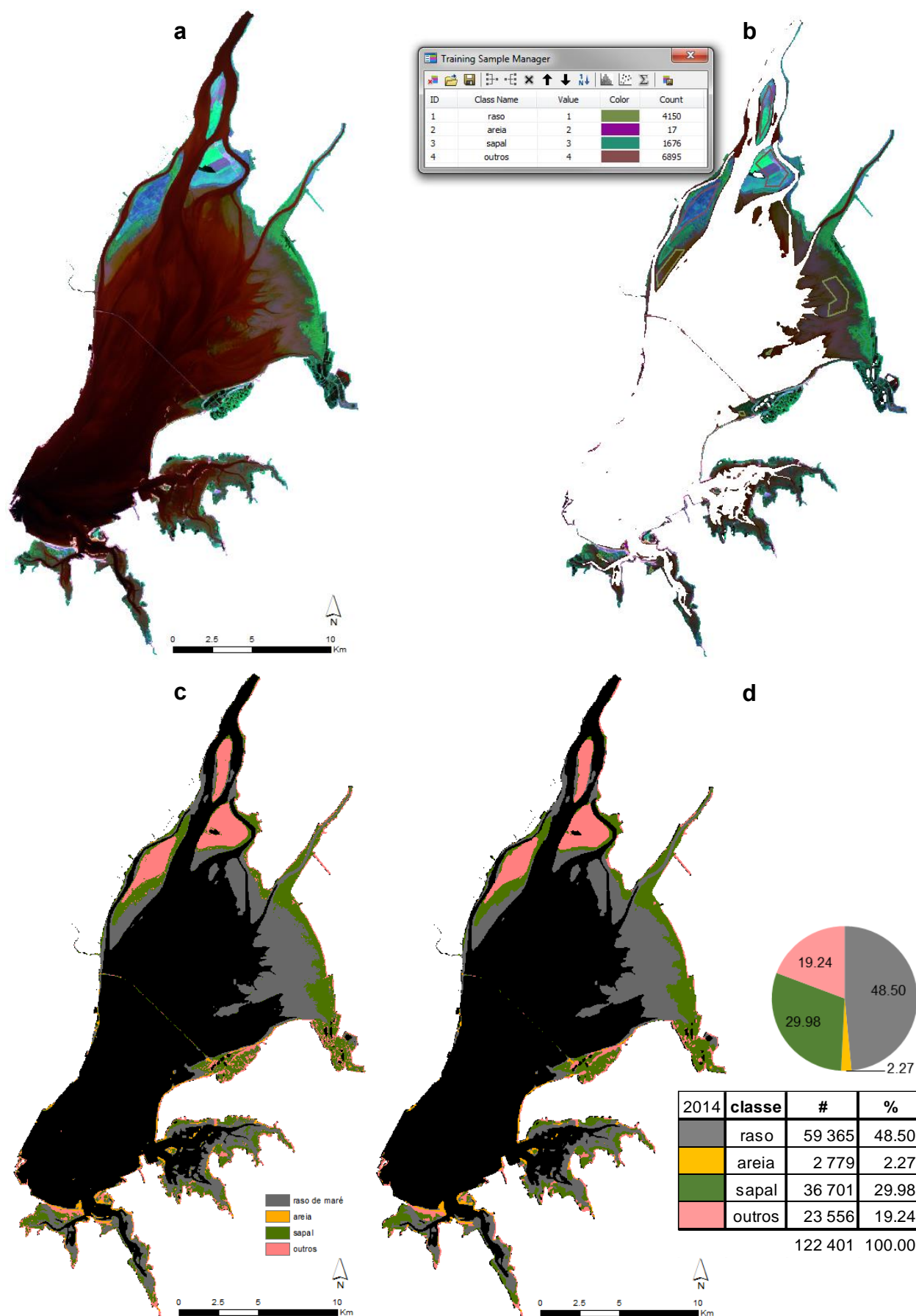


Figura A 0.1. 2014 (LC82040332014302LGN00): (a) imagem compósita 4567; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

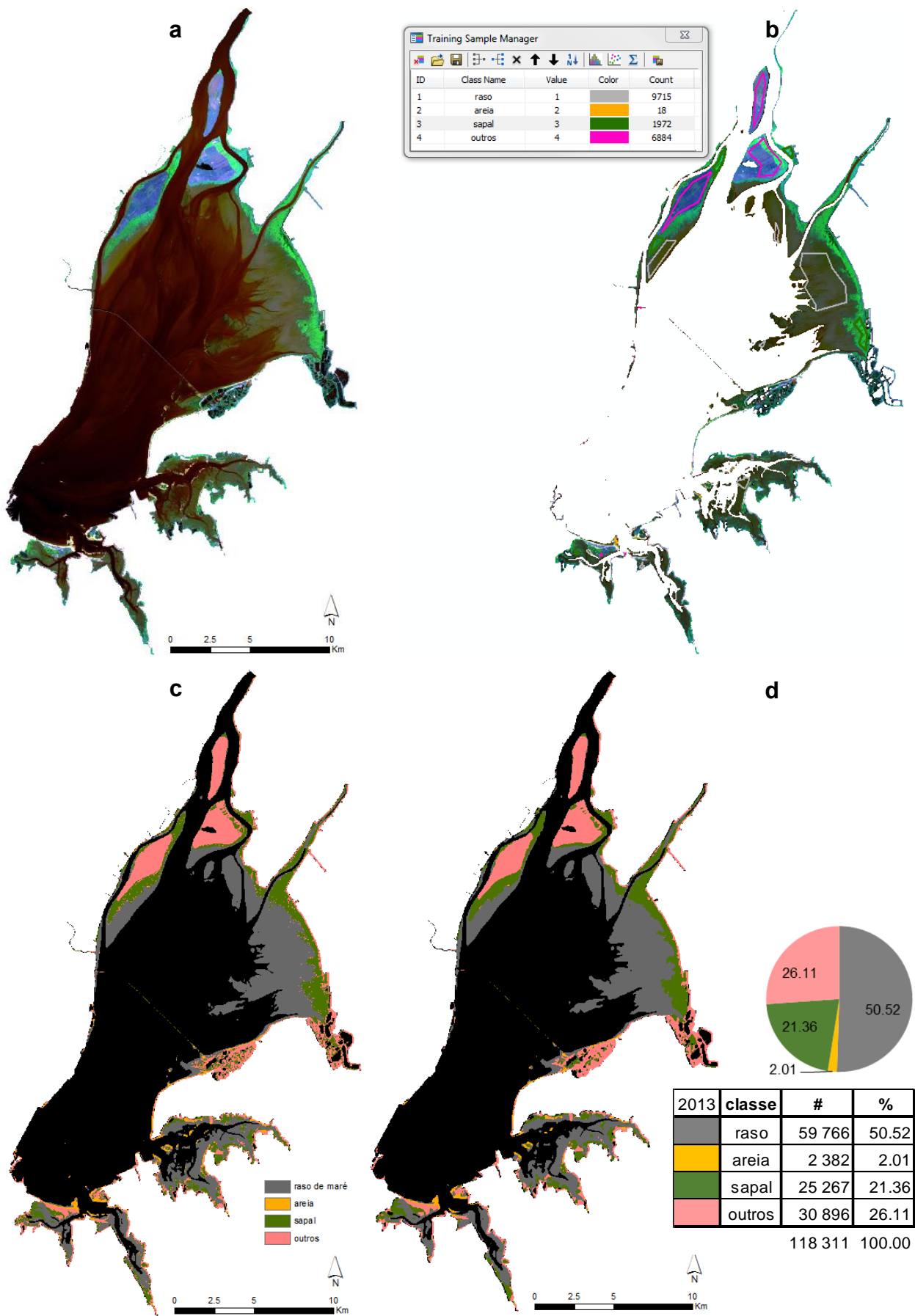


Figura A 0.2. 2013 (LC82040332013283LGN00): (a) imagem compósita 4567; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

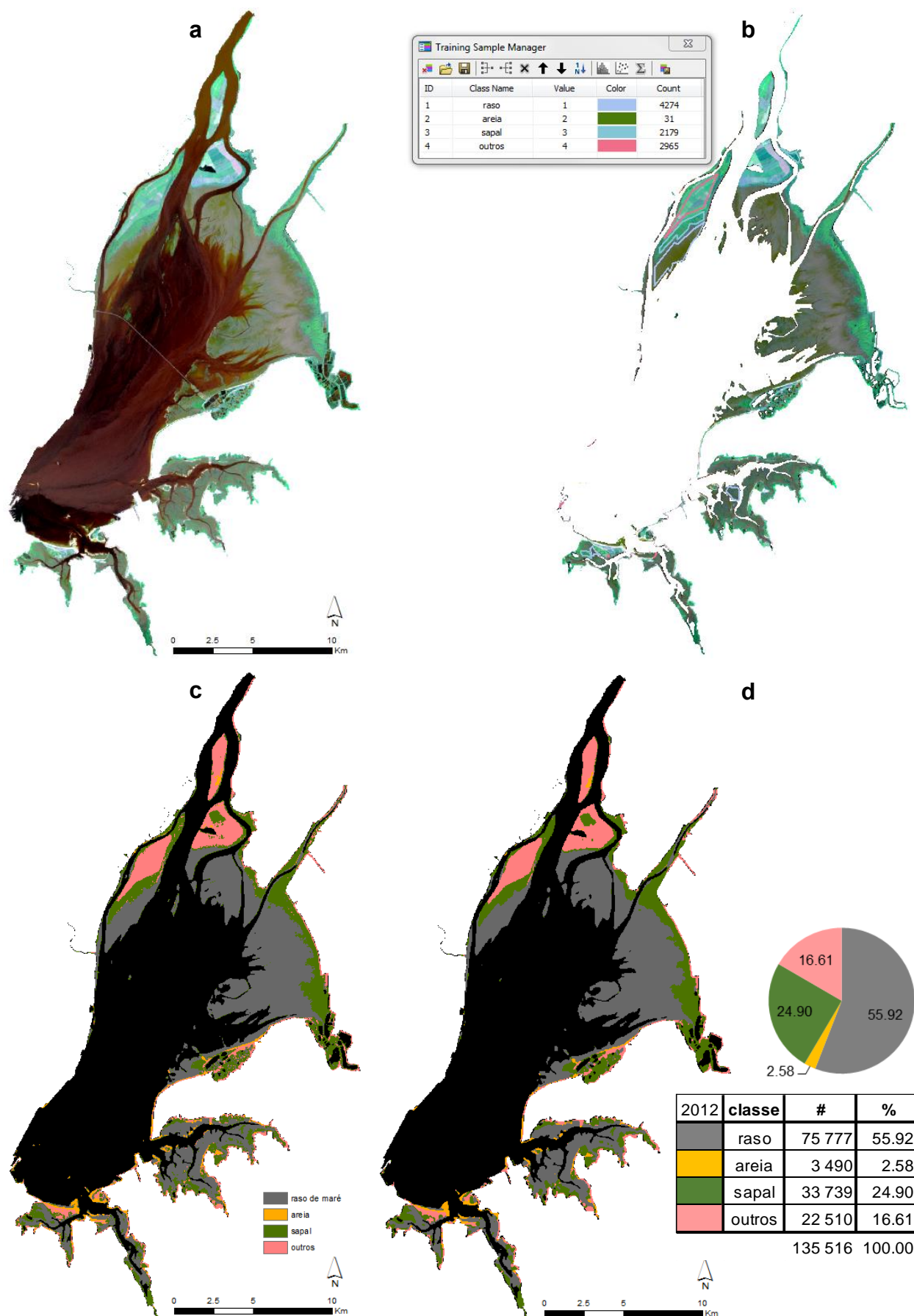


Figura A 0.3. 2012 (LE72040332012145ASN00):(a) imagem compósita 4567; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

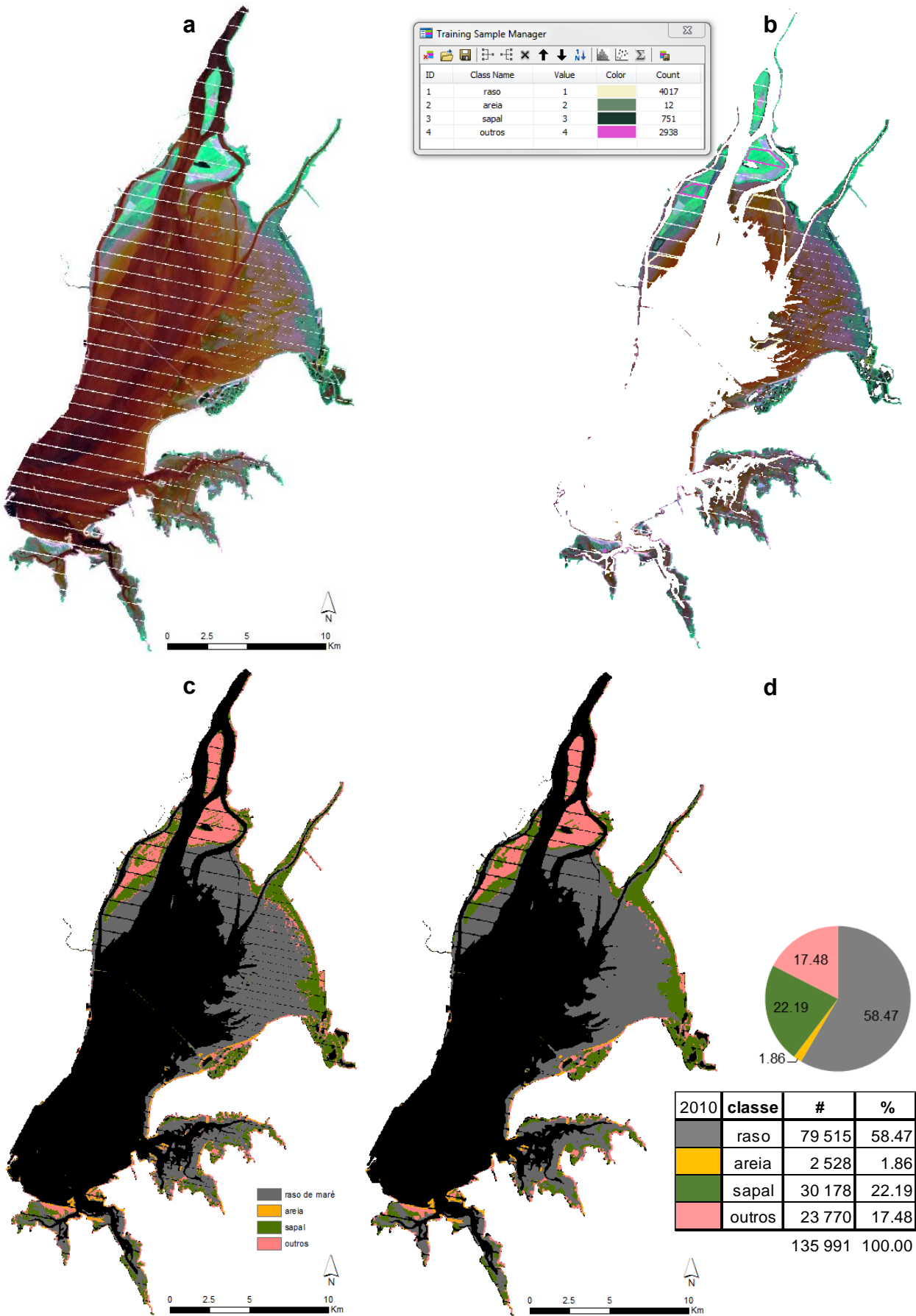


Figura A 0.4. 2010 (LE72040332010123ASN00): (a) imagem compósita 4567; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

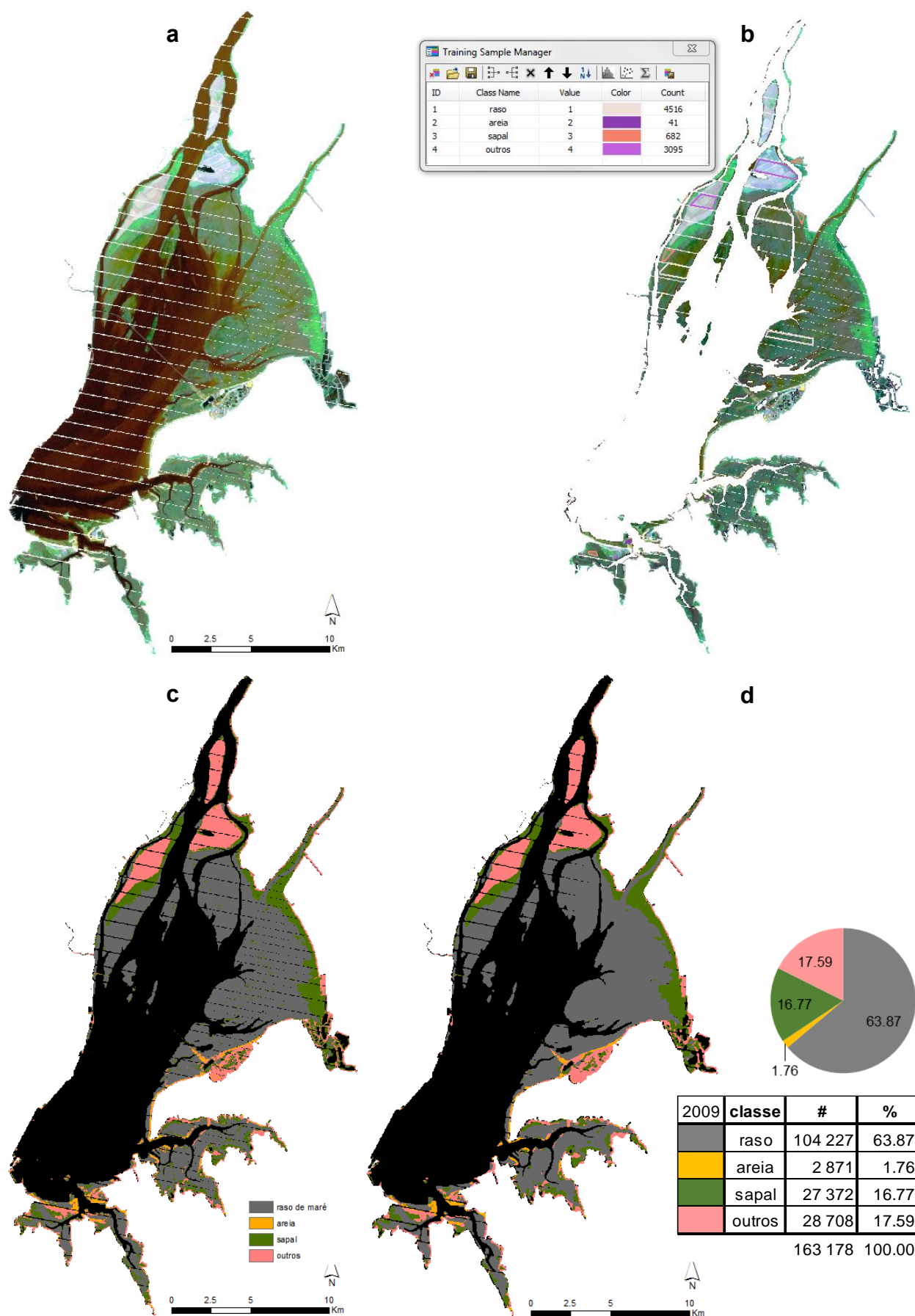


Figura A 0.5. 2009 (LE72040332009264ASN00): (a) imagem compósita 4567; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

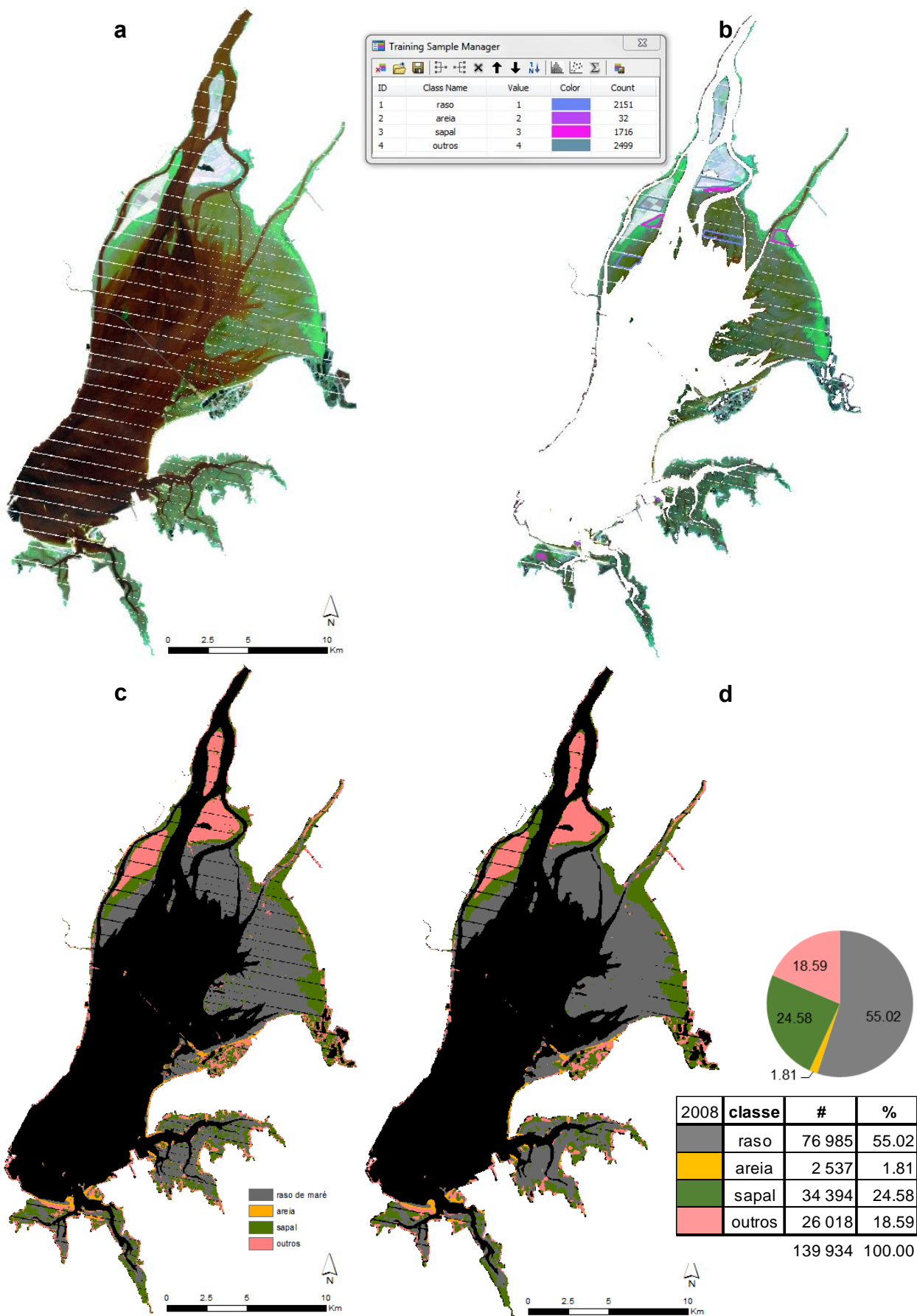


Figura A 0.6. 2008 (LE72040332008278EDC00): (a) imagem compósita 4567; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

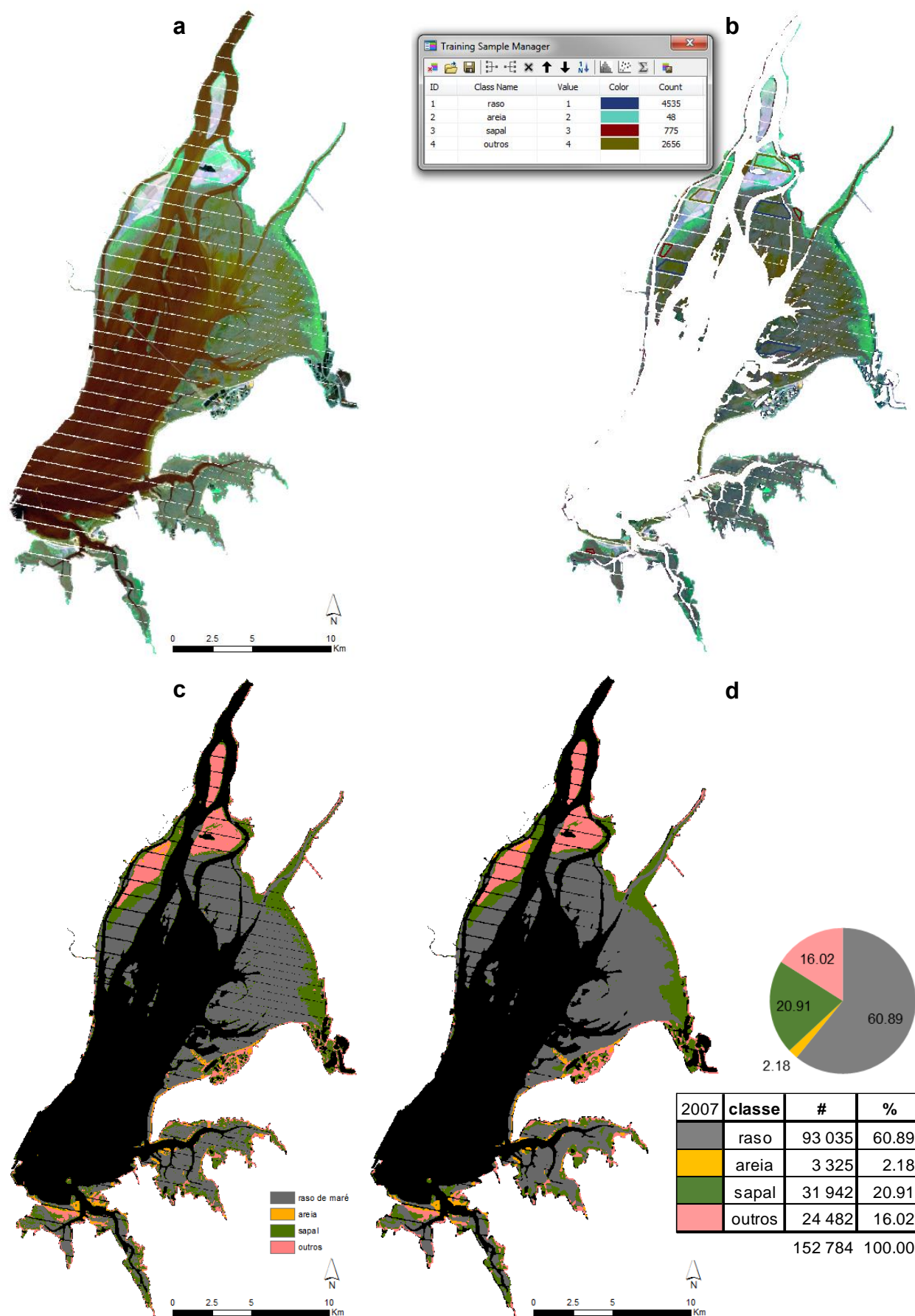


Figura A 0.7. 2007 (LE72040332007243EDC00): (a) imagem compósita 3457; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

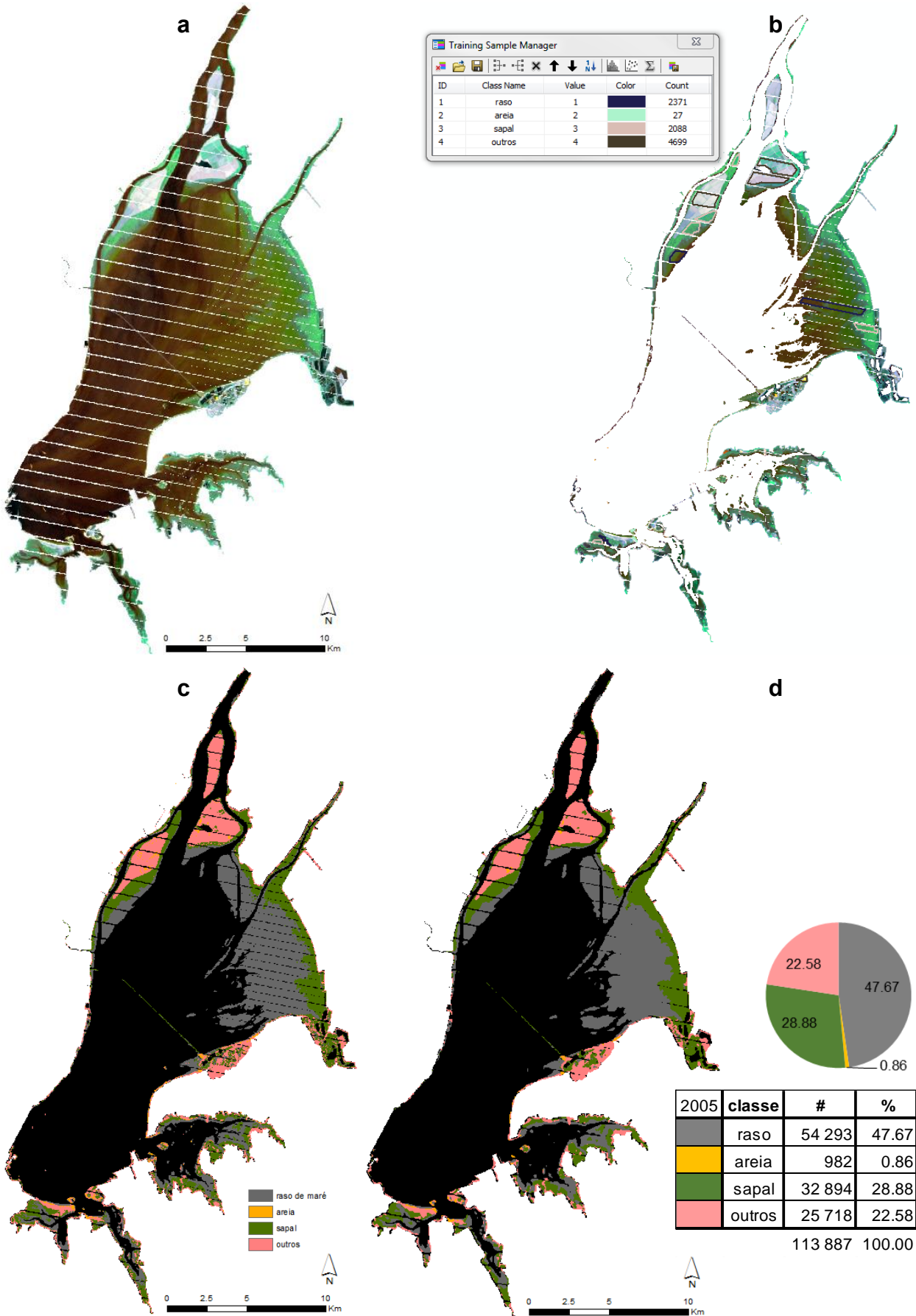


Figura A 0.8. 2005 (LE72040332005237EDC00): (a) imagem compósita 3457; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

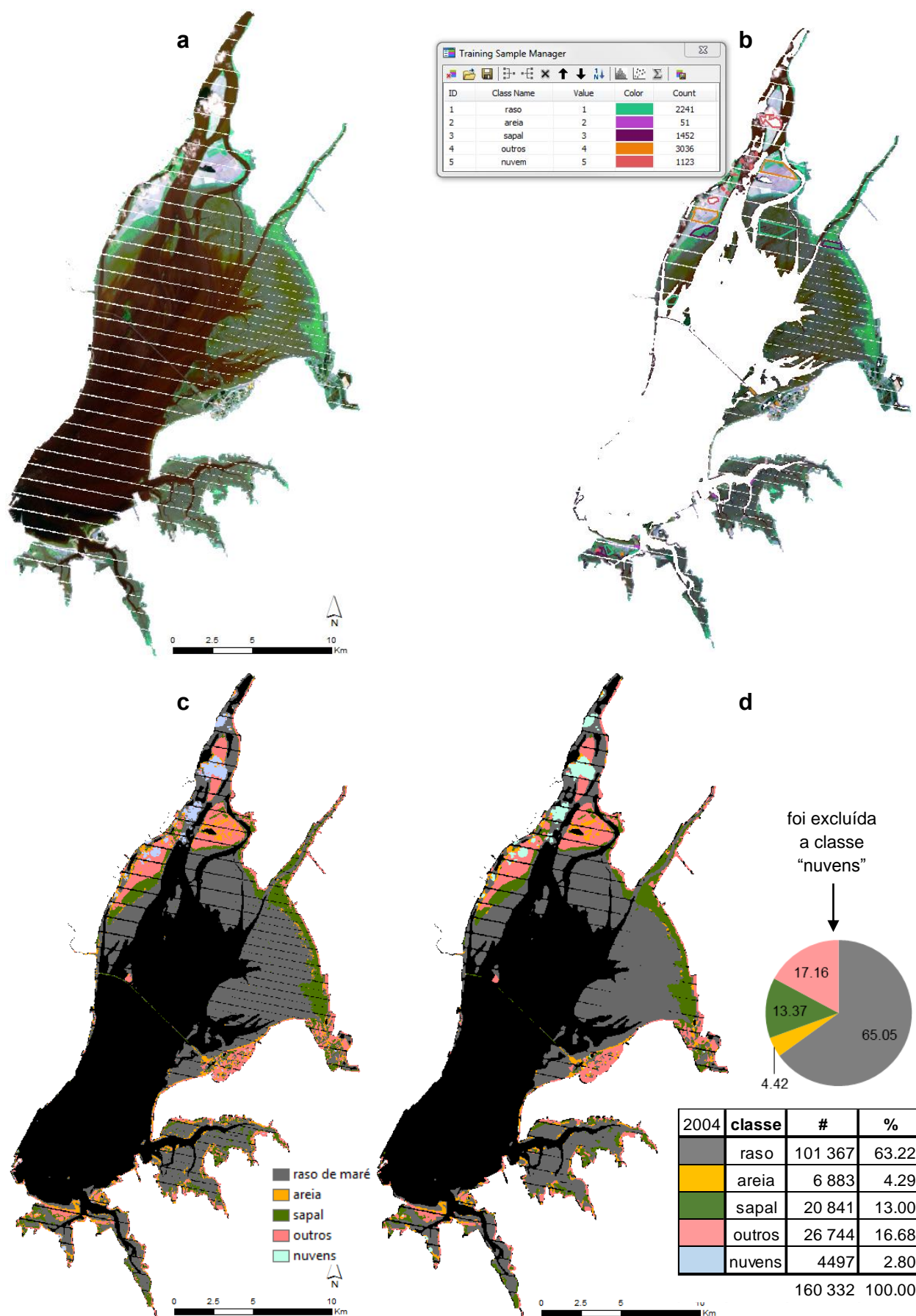


Figura A 0.9. 2004 (LE72040332004203EDC01): (a) imagem compósita 3457; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

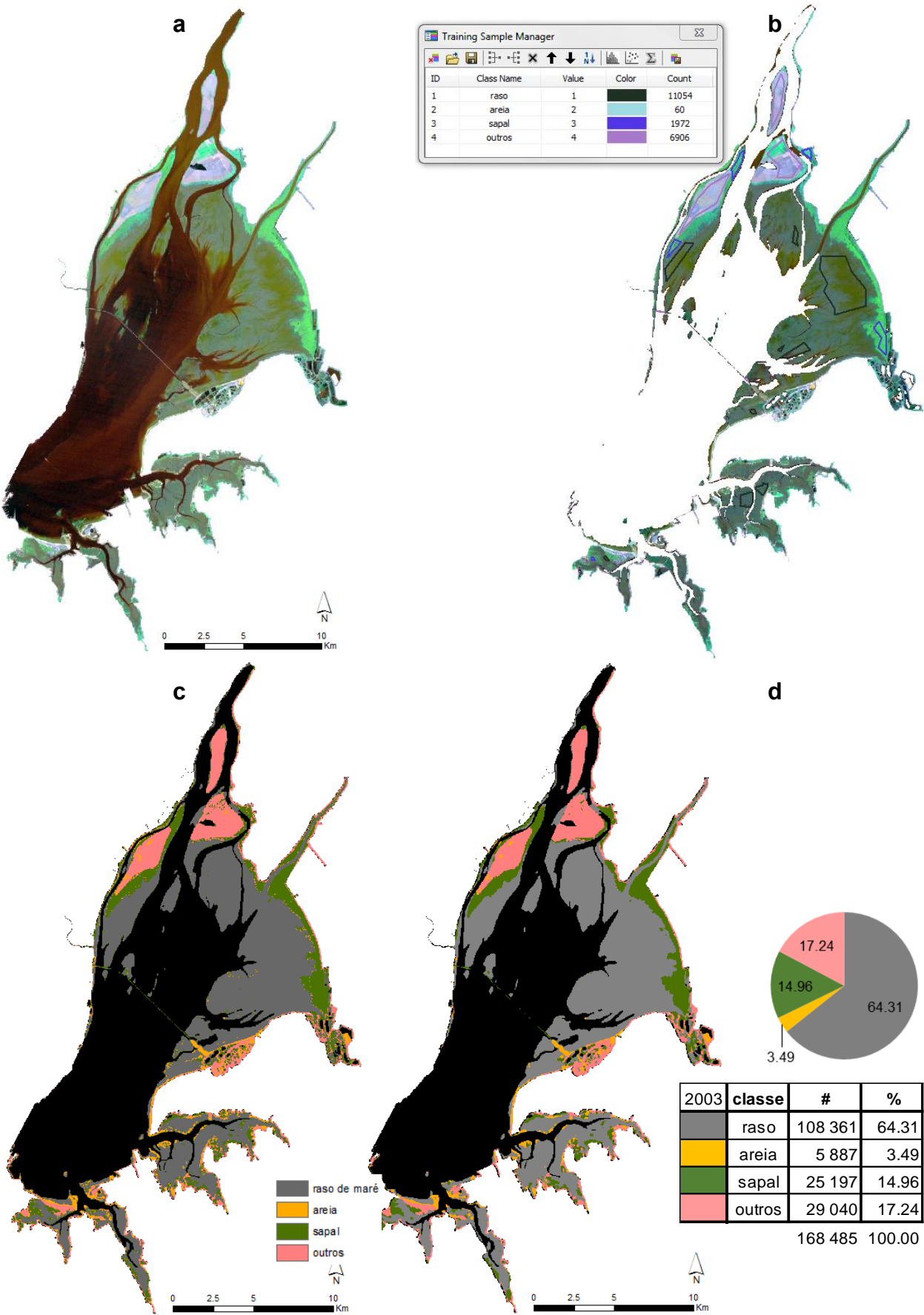


Figura A 0.10. 2003 (LT52040332003256MTI01): (a) imagem compósita 3457; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

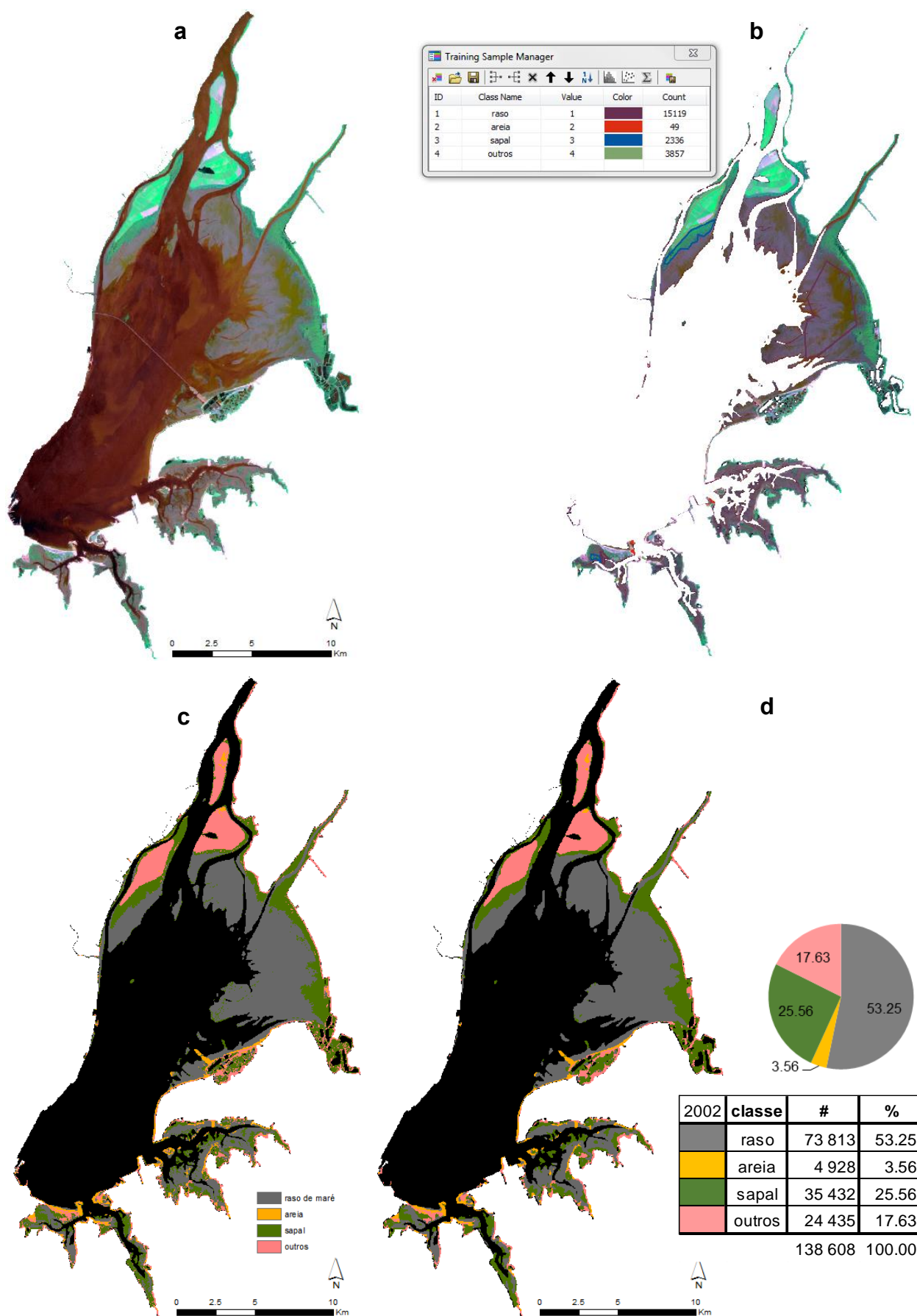


Figura A 0.11. 2002 (LE72040332002117EDC00): (a) imagem compósita 3457; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

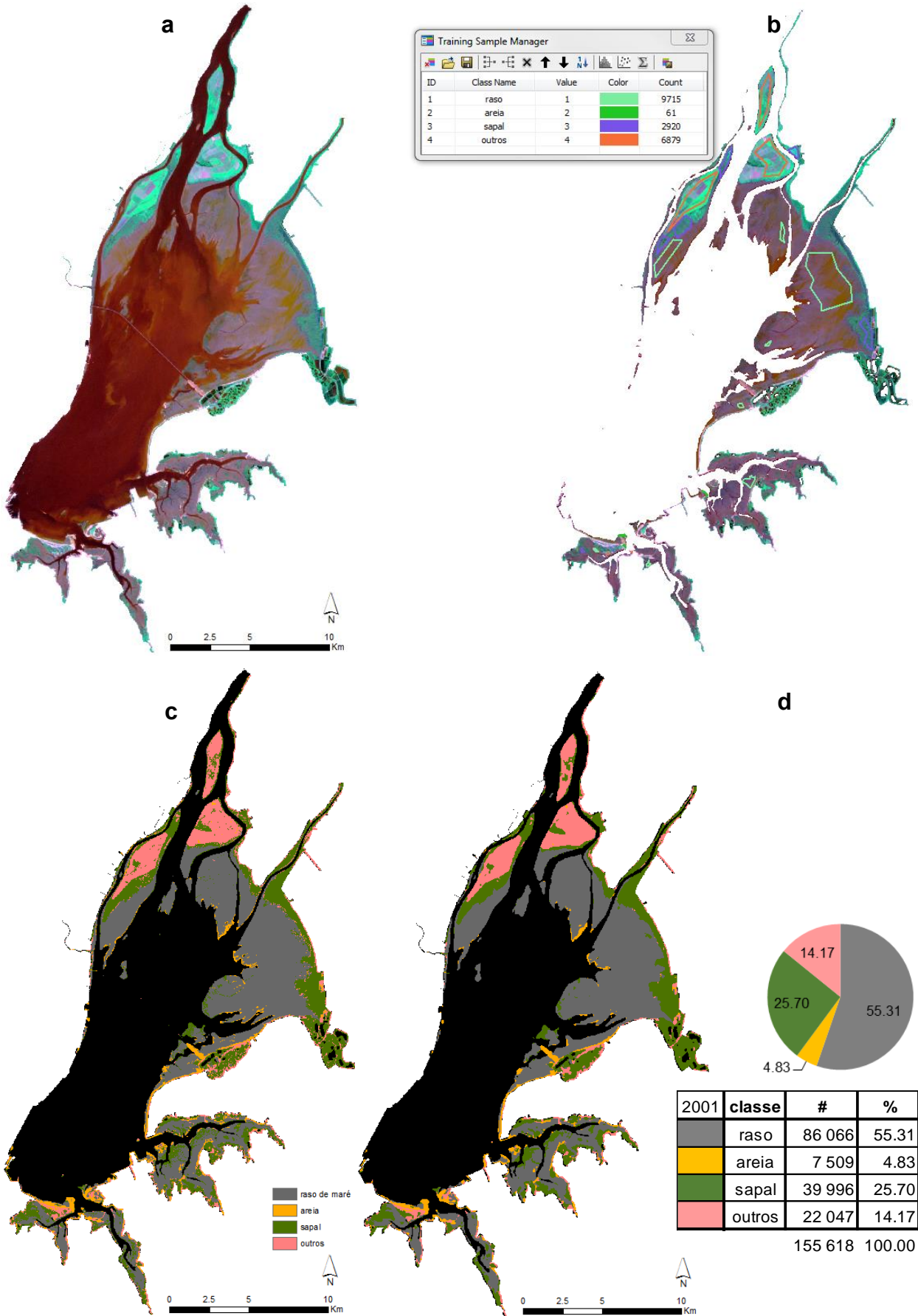


Figura A 0.12. 2001 (LE72040332001098EDC00): (a) imagem compósita 3457; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

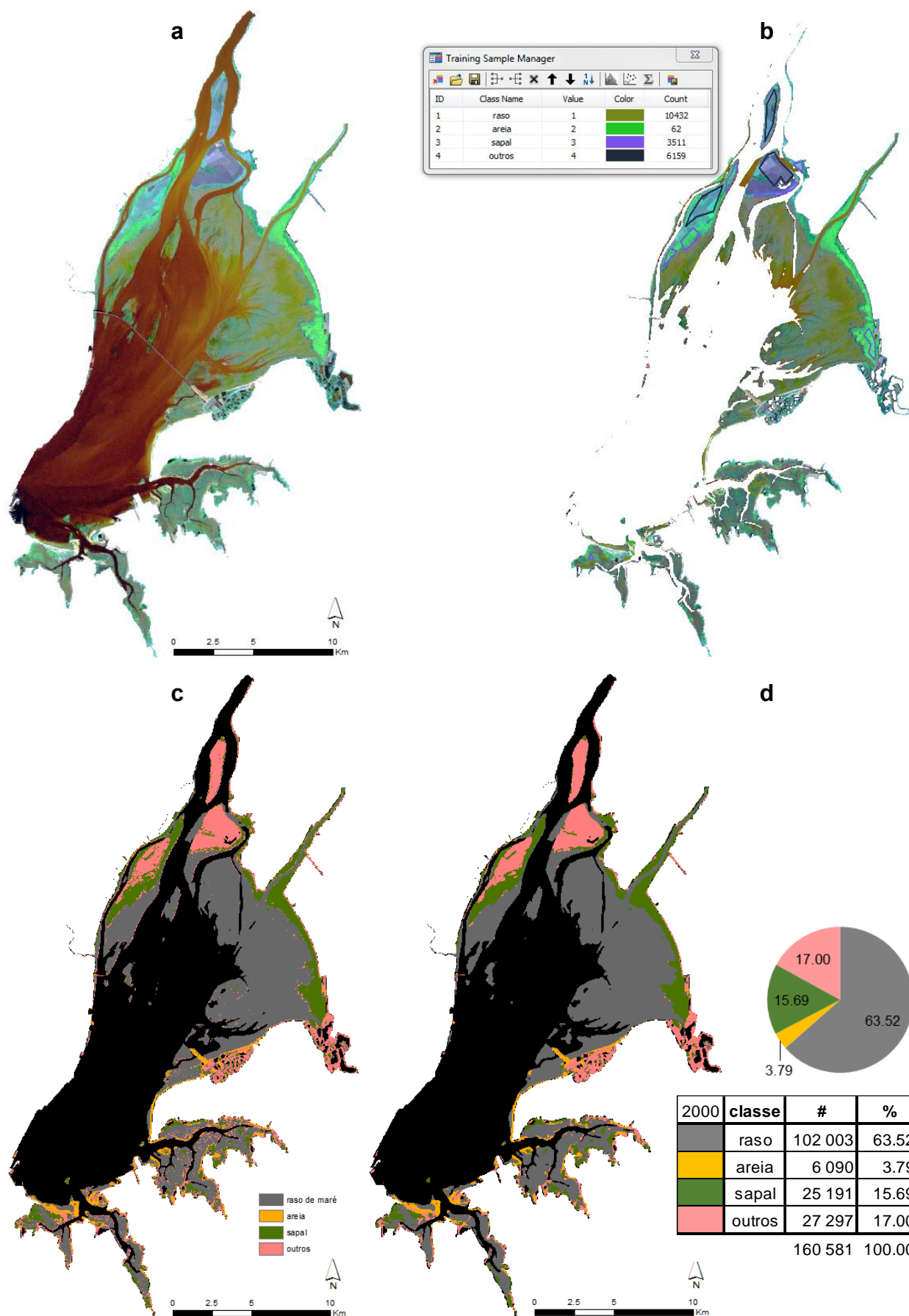


Figura A 0.13. 2000 (LE72040332000320AGS00): (a) imagem compósita 3457; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

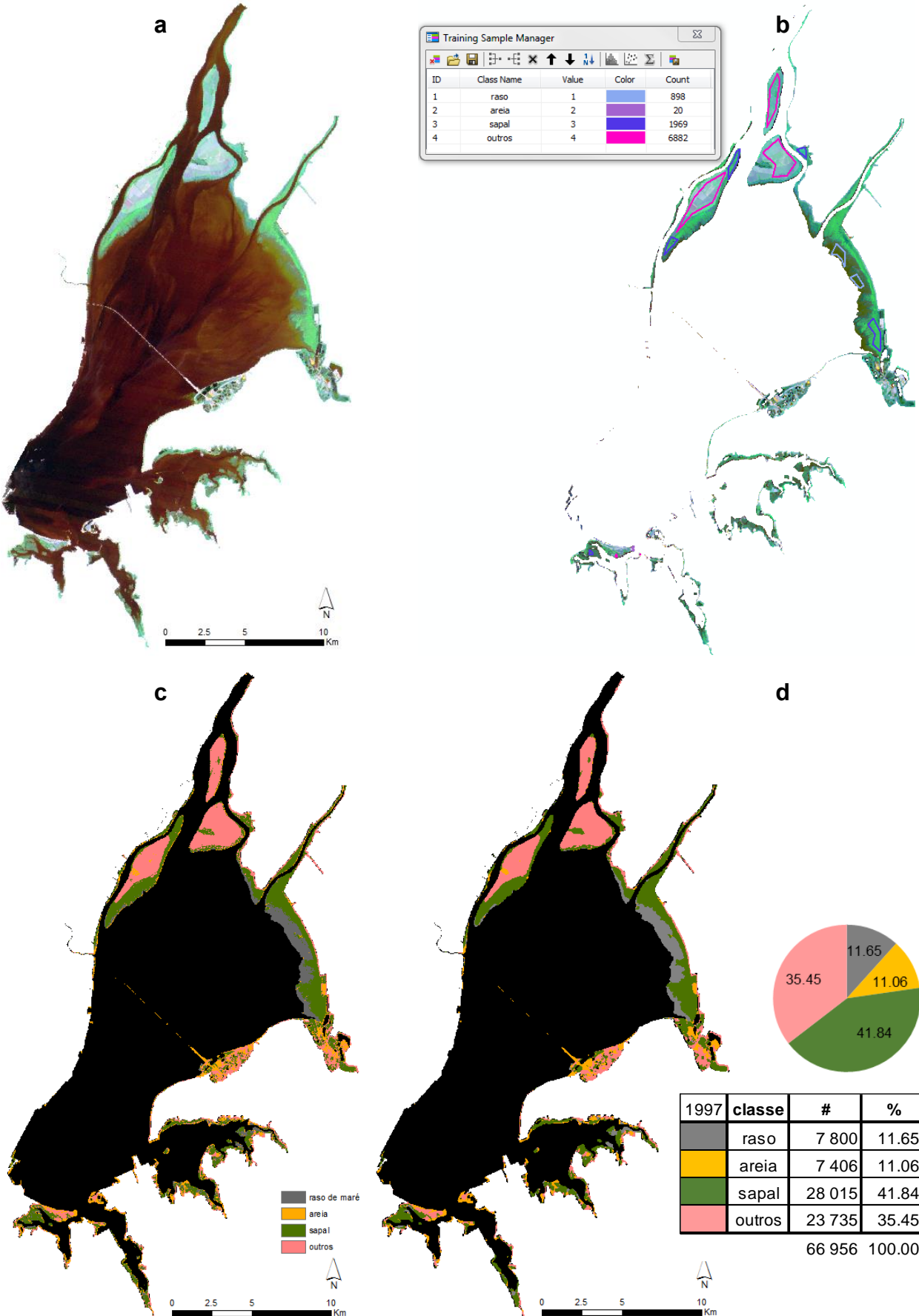


Figura A 0.14. 1997 (L5204000_00019970726): (a) imagem compósita 3457; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

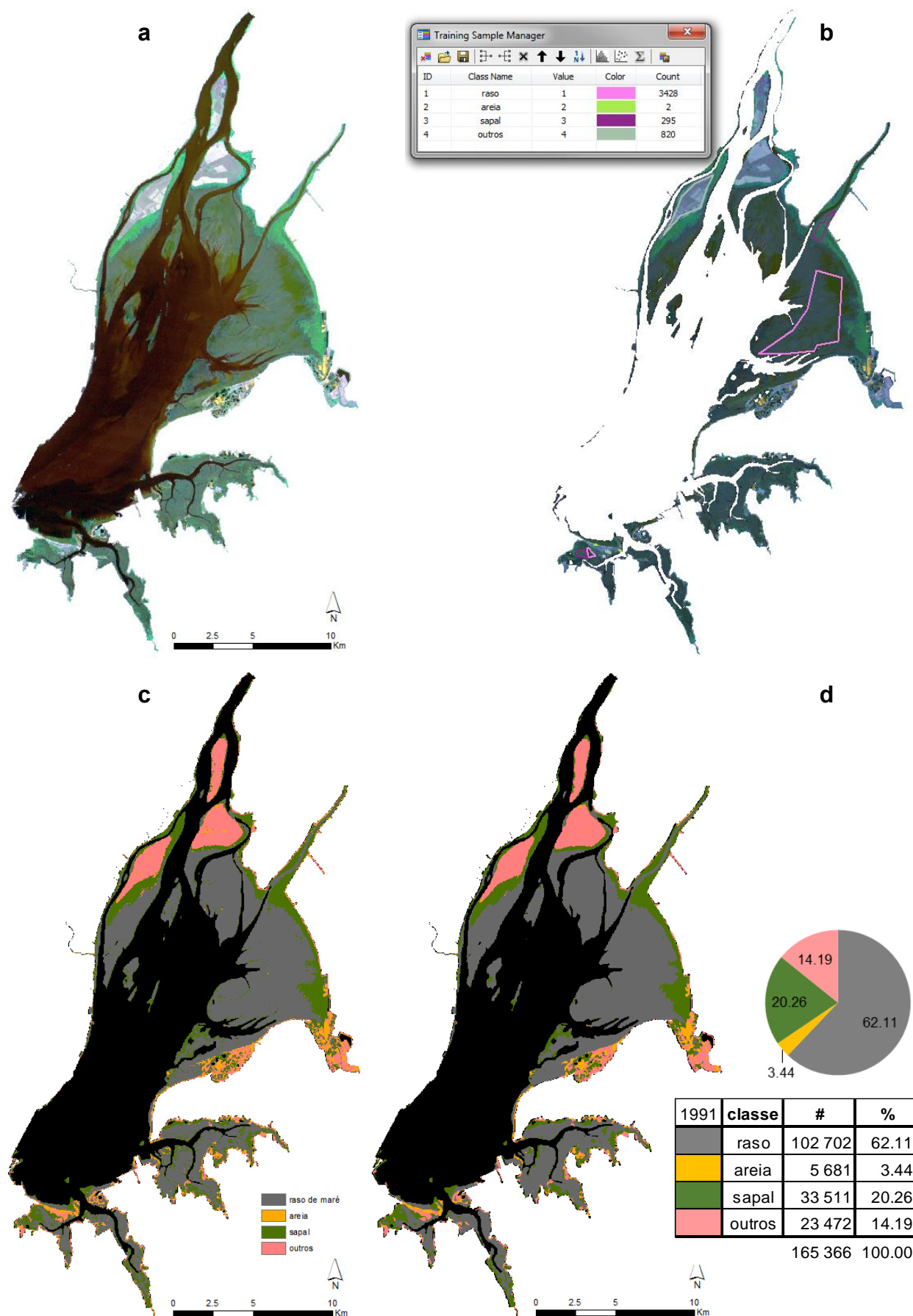


Figura A 0.15. 1991 (L5204000_00019910811): (a) imagem compósita 3457; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

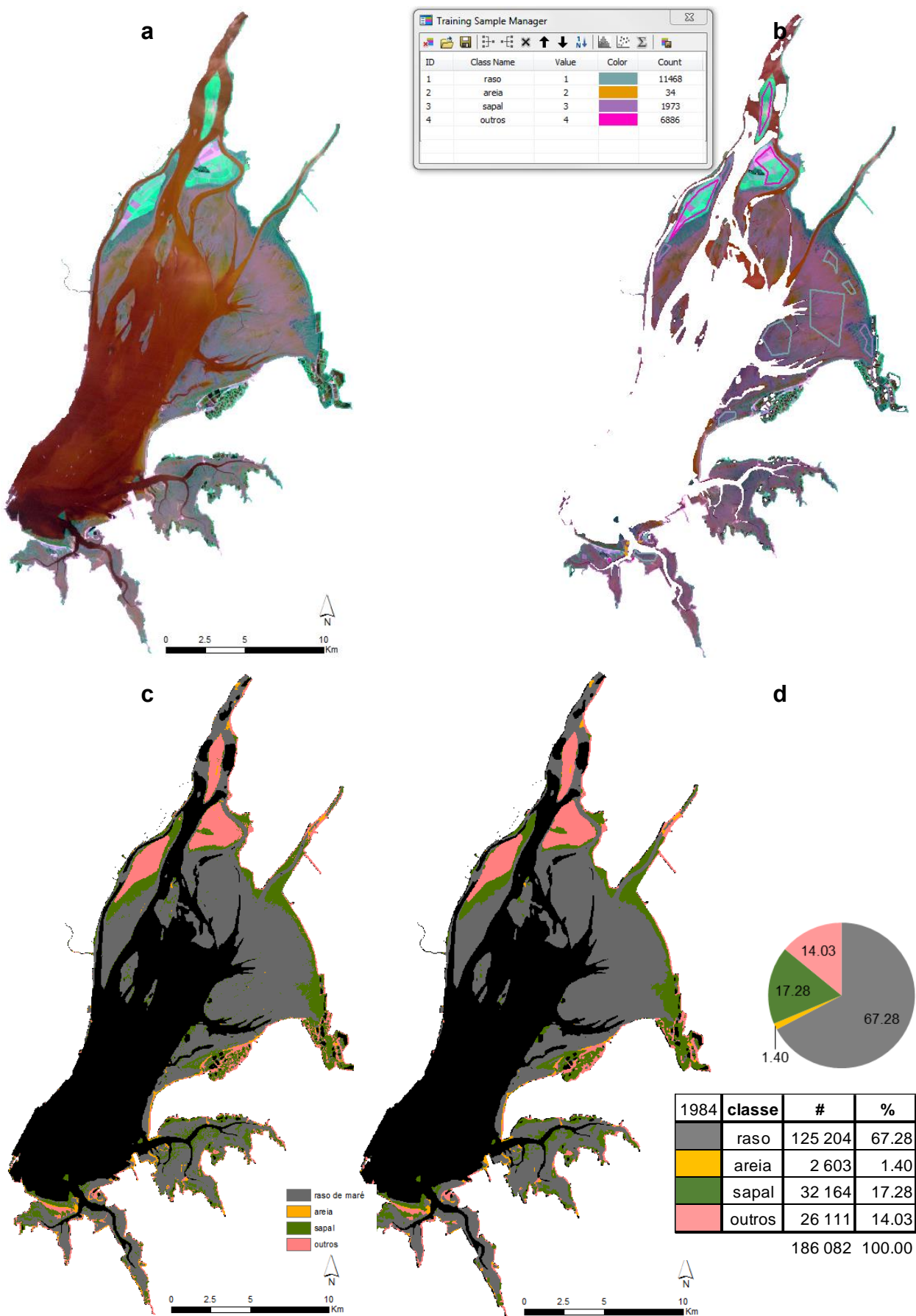


Figura A 0.16. 1984 (LT52040331984108XXX01): (a) imagem compósita 3457; (b) áreas emersas com os polígonos de treino; (c) imagem classificada; (d) imagem classificada generalizada.

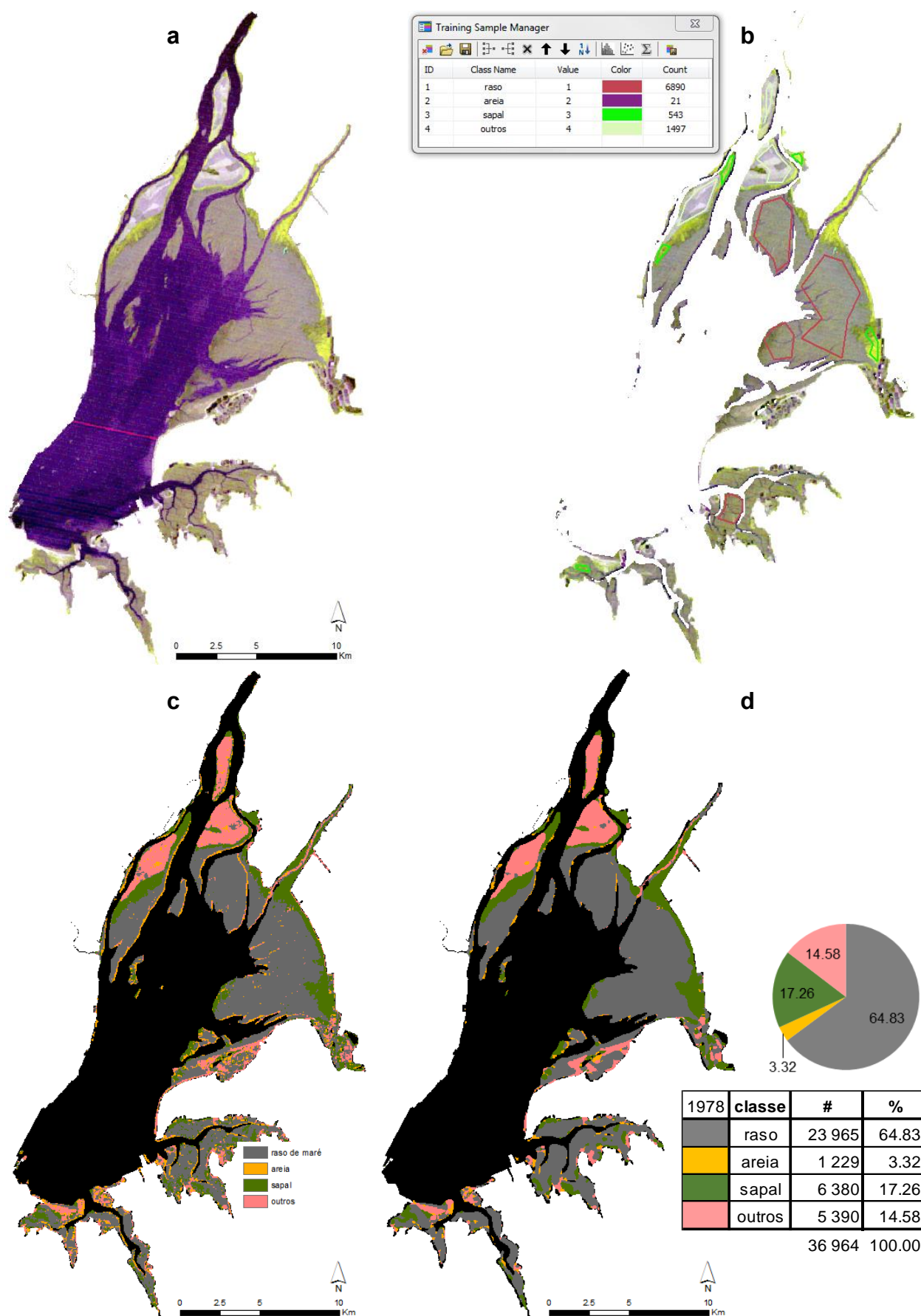


Figura A 0.17. 1978 (M2220033_03319781101): **(a)** imagem compósita 6754; **(b)** áreas emersas com os polígonos de treino; **(c)** imagem classificada; **(d)** imagem classificada generalizada.